

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC Centro Tecnológico
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Aplicação e validação de modelos térmicos de motores para máquinas de lavar roupas

*Monografia submetida à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação da disciplina:*

DAS 5511: Projeto de Fim de Curso

Edson Moraes Menegatti

Florianópolis, março de 2014

Aplicação e validação de modelos térmicos de motores para máquinas de lavar roupas

Edson Moraes Menegatti

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Romulo Silva de Oliveira

Assinatura do Orientador

Luiz Henrique Reis de Castilho Stival

Assinatura do Orientador

Agradecimentos

Agradeço à minha família pelo suporte não só durante a execução deste projeto, mas também durante toda a graduação; à minha namorada, Laura, por estar presente a todos os momentos e incentivando o progresso quando eu mais precisava; aos amigos, pelos conselhos, ideias e debates que ajudaram-me em meu desenvolvimento.

Agradeço também aos meus orientadores, pelo direcionamento e experiências; professores, sem os quais não teria conhecimento para a realização do projeto; e a Universidade Federal de Santa Catarina, pela estrutura disponibilizada ao longo da graduação para o aprimoramento como profissional.

Finalmente, agradeço à Whirlpool, na qual foi executado este projeto, por seu programa de estágio, que me propiciou a oportunidade de trabalhar um um projeto inovador dentro de uma empresa multinacional; e aos colegas que lá encontrei, por sua constante disponibilidade em ensinar e remover obstáculos ao meu trabalho.

Sumário

Resumo	iv
Abstract	v
Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
1 Introdução	1
1.1 Estrutura do trabalho	1
2 A Empresa e o Projeto	2
2.1 A empresa	2
2.2 Problemas abordados no trabalho	3
2.2.1 Estimação de Temperatura	5
3 Motores de Ímãs Permanentes	6
3.1 Estrutura de uma máquina de lavar	6
3.2 Sistemas de transmissão	8
3.3 Princípios fundamentais de motores elétricos	11
3.4 Modelo e controle de motores de ímãs permanentes	14
4 Modelo Térmico	18
4.1 Tecnologias utilizadas na indústria	18
4.2 Medição de resistência	22
4.3 Elementos do modelo térmico	25
4.3.1 Perdas em um motor elétrico	26

4.3.2	Transferência de calor	27
4.4	Modelagem do comportamento térmico	28
4.5	Implementação em plataforma embarcada	30
5	Desenvolvimento	32
5.1	Instrumentação	32
5.1.1	Motor A	34
5.1.2	Motor B	35
5.2	Sistema de aquisição	37
5.3	Calibração	39
5.3.1	Motor A	39
5.3.2	Motor B	42
5.4	Verificação do modelo térmico em tempo de execução	43
5.4.1	Motor A	44
5.4.2	Motor B	45
5.5	Realimentação com o modelo térmico	48
6	Resultados	49
6.1	Verificação do modelo térmico em tempo de execução	49
6.1.1	Motor A	49
6.1.2	Motor B	50
6.2	Realimentação do modelo térmico	52
7	Conclusões e Perspectivas	54
	Referências	55

Resumo

Eletrodomésticos ocupam um papel central em nossas casas e, como resultado, esta é uma das áreas mais competitivas do mercado. Consumidores requerem constantemente produtos mais bonitos, eficientes e capazes de se adequarem às suas necessidades, reduzindo esforços e promovendo aumentos de comodidade e só as empresas capazes de atendê-los permanecerão no mercado. Propõe-se, para contribuir com a satisfação dessas demandas, um modelo térmico para motores de máquinas de lavar, capaz de representar os processos de geração e transferência de calor na estrutura desse equipamento e estimar adequadamente a temperatura do motor ao longo de seu período de operação, gerando informações importantes para o laço de controle do produto. Este documento aborda, portanto, a aplicação e validação de um modelo térmico para motores de máquinas de lavar roupas, com o intuito de reduzir o consumo energético e aumentar a capacidade de flexibilização destes equipamentos, trazendo vantagens evidentes aos usuários e sobre os demais concorrentes.

Abstract

Home appliances hold a central role in our homes and, as a result, represent one of the most competitive fields in the market. Consumers constantly require more beautiful, efficient and customizable products, capable of reducing efforts and allowing higher comfort levels. Only companies able to achieve such requirements will remain competitive in the market. In order to satisfy such customer demands, it is proposed a thermal model for washing machine motors, capable of representing heat generation and transfer processes along the motor structure, as well as estimating the motor temperature correctly throughout its operation, providing important informations to the control loop of the product. This report approaches the implementation and validation of a washing machine motor thermal model, so as to reduce energy consumption and increase this equipment flexibility, presenting clear advantages to its users and over competitors.

Lista de Figuras

2.1	Evolução da quantidade de modelos certificados com o selo Procel [1] .	4
3.1	Exemplos de máquinas de lavar roupas de eixo vertical e horizontal [2]	7
3.2	Vista em corte de uma máquina de lavar evidenciando elementos [3] . .	7
3.3	Comparação entre motores Direct Drive e com polia e correia [4]	9
3.4	Árvore de classificação de motores elétricos [5]	12
3.5	Disposição dos enrolamentos trifásicos [6]	13
3.6	Representação do campo girante [7]	13
3.7	Inversor de frequência	14
3.8	Eixos de referência após transformações matemáticas no modelo do motor [8]	16
3.9	Estrutura de controle do método DTFC [8]	17
4.1	Adaptação de ciclo em função da temperatura [9]	20
4.2	Inversor de frequência salientando transdutores de corrente	23
4.3	Modelo termico no software Dymola [9]	29
4.4	Algumas das equações geradas pelo software Dymola [9]	30
4.5	Algumas das equações diferenciais da figura 4.4 discretizadas [9] . . .	31
4.6	Fluxo de informação entre laço de controle, modelo térmico e rotina de medição de resistência	31
5.1	Exemplo do gradiente de temperatura no estator [10]	33
5.2	Efeito Seeback [11]	34
5.3	Módulo de aquisição NI9211 [12]	35
5.4	Instrumentação dos enrolamentos do motor A	35
5.5	Instrumentação do ferro do motor A	36
5.6	Instrumentação do motor B	36

5.7	Interface visual do software	37
5.8	Diagrama de blocos em Labview	38
5.9	Influência da interferência eletromagnética na medição de temperatura	38
5.10	Motor A - Perfil de temperatura para ciclo de agitação	40
5.11	Motor A - Perfil de temperatura durante centrifugação	41
5.12	Motor A - Perfil de temperatura durante ciclo completo	42
5.13	Motor B - Perfil de temperatura durante ciclo de agitação e arrefecimento natural	43
5.14	Motor B - Perfil de temperatura durante ciclo de agitação e centrifugação	44
5.15	Motor A - Comparação entre a temperatura estimada e medida	45
5.16	Motor B - Comparação entre temperaturas medida e estimada - Temperatura do motor 4°C	46
5.17	Motor B - Comparação entre temperaturas medida e estimada - Temperatura do motor 100°C	47
5.18	Motor B - Comparação entre temperaturas medida e estimada - Temperatura do motor 25°C	47
5.19	Motor B - Perfil de temperatura e comportamento do motor após realimentação	48
6.1	Motor A - Erro de estimação para ciclo completo	50
6.2	Motor B - Erro de estimação sem algoritmo de correção	51
6.3	Motor B - Erro de estimação após utilização do método de correção - Temperatura do motor 100°C	51
6.4	Motor B - Erro de estimação após utilização do algoritmo de correção - Temperatura do motor 25°C	52
6.5	Motor B - Comparação entre ciclos utilizando ou não a realimentação do modelo térmico	53

Lista de Tabelas

4.1	Comparação entre diferentes tecnologias de motores elétricos.	25
-----	---	----

Capítulo 1: Introdução

Eletrodomésticos ocupam papel central em nossas vidas, ao refrigerar e conservar nossos alimentos, auxiliar na limpeza de nossas casas ou lavar nossas roupas, reduzindo esforços e trazendo comodidade ao substituir tarefas que tomariam tempo do usuário. Mas para assumir tal papel, essa classe de produtos tem que ser aprovada no crivo dos consumidores, verdadeiramente trazendo benefícios ao consumidor e apresentando diferenciais positivos em relação aos concorrentes.

Uma das soluções encontradas para satisfazer essas exigências é a utilização de estruturas microcontroladas, inserindo capacidade de processamento, possibilitando a flexibilização e customização de funcionamento, controle mais preciso e, portanto, aumento de eficiência e redução do custo de operação.

É proposto, portanto, o desenvolvimento de um algoritmo de estimação de temperatura sem utilização de sensores para máquinas de lavar, visando aumento da vida útil dos motores empregados, capacidade de flexibilização dos ciclos de lavagem e redução do consumo de energia pelo produto.

O algoritmo consiste no emprego de um modelo térmico, que represente o comportamento físico do motor e, através da utilização de variáveis já disponíveis na estrutura microcontrolada do produto, gerar estimativas adequadas de sua temperatura, servindo como base para ciclos adaptativos e substituição ou redução do uso da solução em uso no momento.

1.1: Estrutura do trabalho

Este trabalho foi organizado de forma a permitir ao leitor conhecer gradualmente a empresa e o contexto do projeto, o embasamento teórico para a sua execução, o trabalho desenvolvido e, finalmente, os resultados obtidos na etapa de desenvolvimento. Dessa forma o documento é dividido em sete capítulos descritos a seguir.

O presente capítulo é introdutório ao tema e apresenta a estrutura do trabalho.

No capítulo 2, apresenta-se a empresa e suas áreas de desenvolvimento, seguida da apresentação formal do problema que espera-se resolver neste projeto, motivando quanto à sua execução.

O capítulo 3 aborda a estrutura de uma máquina de lavar e como esta se conecta com os motores utilizados. Também apresenta-se um breve embasamento sobre o princípio funcional dos motores elétricos e a influência da temperatura em seu funcionamento e na operação da estrutura de controle.

O capítulo 4 aborda o modelo térmico, apresentando as fontes de geração de calor em um motor elétrico, processos de transferência térmica e as etapas necessárias para a conversão de um modelo térmico para a estrutura embarcada utilizada.

O capítulo 5 corresponde ao desenvolvimento e aplicação do modelo térmico em protótipos de produtos da companhia, expondo os experimentos realizados com o intuito de verificar a robustez da solução proposta.

O sexto capítulo apresenta os resultados provenientes dos ensaios executados no capítulo anterior, analisando-os e definindo se as metas propostas foram atingidas.

O último capítulo conclui o documento através das considerações finais e das perspectivas futuras para a aplicação do método descrito no capítulo 4.

Capítulo 2: A Empresa e o Projeto

2.1: A empresa

A Whirlpool Corporation, fundada em 1911 nos Estados Unidos, é a maior empresa produtora de eletrodoméstico do mundo, sendo conhecida através de suas marcas Whirlpool, Maytag, Brastemp, Consul, Bauchnekt, Kitchen Aid, entre outras. Sua atuação em mais de 70 países é dividida entre quatro regiões do globo: América do Norte; América Latina; Europa, África e Oriente Médio; Ásia [2]. A organização emprega mais de 68 mil funcionários e apresenta uma receita bruta da ordem de 18 bilhões de dólares [13], posicionando-a entre as 200 maiores empresas americanas [14].

A região da América Latina, especificamente, conta com unidades em oito países, como Argentina e Peru, sendo o principal deles o Brasil. No país, existem três centros fabris (Manaus, Rio Claro e Joinville), dois centros de distribuição (São Paulo e Pernambuco), além do centro administrativo da região, também em São Paulo, que empregam 14,5 mil funcionários ao todo. [15]

Um dos pilares que norteiam a estratégia da companhia é a inovação, por sua capacidade de agregar valor aos produtos, diferenciando-os dos demais disponíveis no mercado, fidelizando clientes e fortalecendo suas marcas. Como resultado, só no Brasil, há 23 laboratórios de pesquisa e desenvolvimento e quatro centros de tecnologia dedicados a cocção, condicionamento de ar, lavanderia e refrigeração, que contribuem para tornar a empresa a quarta colocada nacional em registro de patentes. Adicionalmente, há dois anos, um quarto da receita foi obtida através de soluções inovadoras.

De forma complementar a esses centros de pesquisa, existe em Joinville um departamento de pesquisa e desenvolvimento, executando projetos principalmente na área de lavadeira, especificamente para o mercado internacional, isto é, América do Norte e Europa. Esse departamento é subdividido entre áreas de pesquisa e desenvolvimento de tecnologias de motores, Motors Strategy, pesquisa de métodos de sensoriamento, instrumentação e controle de sistemas, Control & Sensing, e desenvolvimento de algoritmos de controle de motor responsável pelo acionamento das máquinas, Motor Control

Este estágio foi realizado na última área descrita com foco no desenvolvimento e validação de um modelo térmico para os motores de lavadoras tanto de eixo vertical quanto horizontal.

2.2: Problemas abordados no trabalho

Poucos setores industriais tem tanta penetração no mercado consumidor quanto o setor de eletrodomésticos. Em 2009, segundo o Departamento de Habitação e Desenvolvimento Urbano (HUD, em inglês), todas as residências pesquisadas apresentavam ao menos um refrigerador, 84% delas possuíam uma máquina de lavar e 81% delas, secadoras de roupa. [16]

A importância de tais equipamentos, evidenciada por estes números, justifica a competitividade do ramo, pois ganhar consumidores significa passar a ocupar um espaço central de suas casas e, portanto, de suas vidas. E esse espaço dificilmente será substituído por concorrentes, devido ao longo tempo de operação desses equipamentos (14 anos em média para máquinas de lavar, por exemplo [17]).

Contudo, isso só é verdade se o produto apresentar diferenciais sobre seus concorrentes, gerando valor para o consumidor, além de possuir robustez e confiabilidade para que opere por longos períodos sem necessidade de manutenção. Adicionalmente, órgãos reguladores impõem padrões de eficiência energética e de lavagem cada vez mais altos.

O aumento da popularidade de padrões de consumo de energia, como o Energyguide nos Estados Unidos, Energuide no Canadá e o selo Procel no Brasil, apontam para uma maior preocupação dos consumidores em adquirir não só produtos baseados em uma marca específica, mas também utilizando métricas de eficiência que permitam compará-lo com seus concorrentes, contribuindo para exacerbar a vantagem trazida até pelos pequenos diferenciais. Concorrentes estes em crescimento constante e igualmente capazes de atender os padrões de consumo definidos, como vê-se na figura 2.1

Máquina de lavar, especificamente, devem atender a critérios de eficiência energética e de lavagem, níveis de ruído audível e temperatura de equipamento durante a operação. Os quais dependem, em muitos casos, do motor instalado, seja pela potência necessário para acioná-lo seja devido a características como torque fornecido.

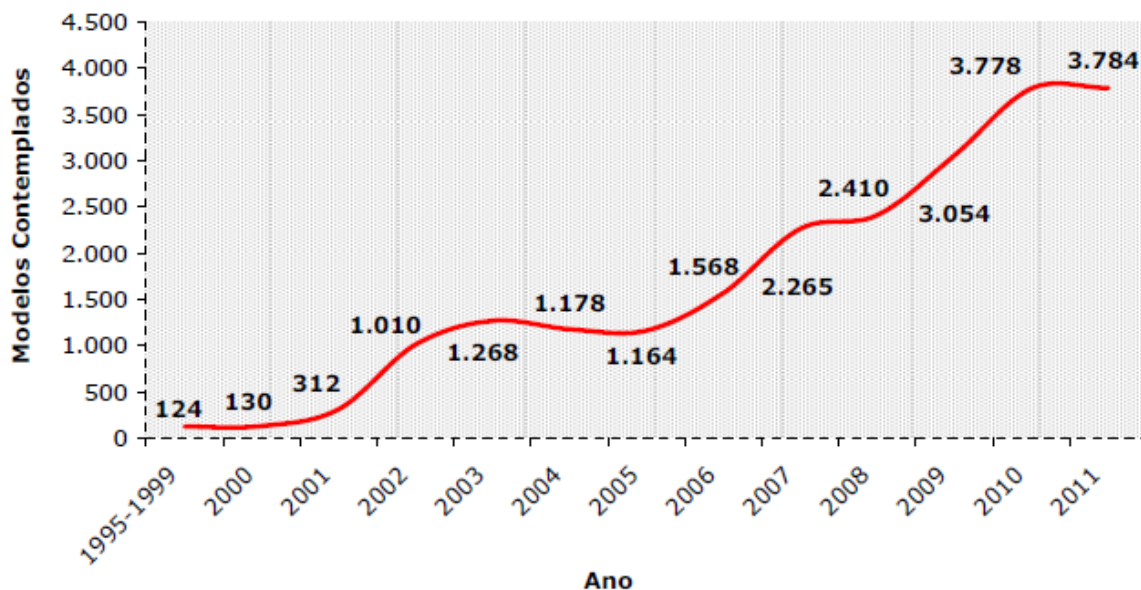


Figura 2.1: Evolução da quantidade de modelos certificados com o selo Procel [1]

Em muitos casos, a única forma de atender estes critérios é controlar as variáveis de interesse, direta ou indiretamente, já que uma alternativa em malha aberta significa utilizar um grande fator de segurança e, portanto, em uma subutilização do equipamento disponível. Como requisito para o controle, necessitamos de uma realimentação de informações e isso pode ser feito através de medições com sensores ou por estimação.

Sensores, no entanto, apresentam desafios à sua aplicação. Remodelagem do processo produtivo, novos modos de falha e custo adicional, que pode assumir grandes somas quando seu valor unitário é multiplicado pela produção anual de uma grande companhia. Por outro lado, sua aplicação é razoavelmente simples e direta quando comparada à métodos de estimação, apresentando níveis de confiabilidade conhecidos previamente através das suas especificações.

Estimar uma variável, de forma similar, também requer maior tempo de desenvolvimento a fim de encontrar formas eficientes de executar a observação da variável, bem como garantir níveis adequados de confiabilidade, em troca de ganhos financeiros e na área de assistência técnica a longo prazo.

Frente a esse cenário, a Whirlpool propõe a utilização de algoritmos *sensorless*, ou seja, baseados em estimação para o controle de parte dessas variáveis. O projeto objeto deste documento encontra-se como componente dessa proposta.

2.2.1: Estimação de Temperatura

O projeto consiste no desenvolvimento e ajuste de um modelo térmico que represente a temperatura de pontos específicos de dois motores distintos empregados em máquinas de lavar de eixo vertical e horizontal, operando tanto durante a etapa de agitação quanto de centrifugação. O embasamento teórico será o mesmo utilizado previamente para outra plataforma de lavadoras de eixo horizontal da empresa.

De forma resumida, dado um conjunto de variáveis de entrada, o modelo é capaz de gerar um valor correspondente de temperatura que seja próximo o suficiente do valor real encontrado no motor. Também se contempla o algoritmo de correção do modelo em tempo de execução, impedindo que ocorram desvios demasiados.

A proposta visa o trabalho de forma conjunta com o algoritmo atual baseado na medição da resistência dos enrolamentos do motor através da injeção de corrente contínua, exclusivamente durante a fase de lavagem. Através do valor dessa resistência é possível estimar a temperatura do motor por uma relação conhecida.

Contudo, tal método é responsável por um breve período de pausa entre cada agitação do cesto a fim de garantir que o motor não estará ultrapassando valores críticos de temperatura, aumento da temperatura e do consumo de energia devido à injeção de corrente e visão limitada da variável em questão fora do período de lavagem. Esta pausa é fruto da necessidade de manter o motor estático para garantir medições coerentes de tensão e corrente.

Dessa forma, uma solução que envolve a utilização de um modelo que estima a temperatura durante todo o tempo de operação resulta em economia energética, financeira – quando comparada ao uso de sensores, aumento da capacidade de adaptação dos ciclos de lavagem, aprimoramento na observação da variável em questão durante o período de centrifugação e, finalmente, melhora a robustez de outros algoritmos que utilizem informações do motor.

Resumidamente, este projeto visa servir como um degrau para a adição de novas funcionalidades e benefícios sensíveis ao consumidor. Nos próximos capítulos, seu embasamento teórico será discutido em maiores detalhes.

Capítulo 3: Motores de Ímãs Permanentes

Como ponto de partida para a compreensão do algoritmo de estimação de temperatura, é necessário explorar os motores cujo comportamento térmico é pedra fundamental da solução. Para aumento da compreensão e contextualização, também apresentar-se-á a estrutura de uma máquina de lavar e suas variações.

O objetivo, portanto, deste capítulo é apontar características gerais dos motores utilizados, avaliar suas características construtivas, vantagens em relação aos demais motores elétricos utilizados pela indústria, sua utilização em uma máquina de lavar, modelo matemático e, principalmente, a influência da resistência em seu comportamento.

3.1: Estrutura de uma máquina de lavar

Uma máquina de lavar tem como principal função promover o movimento de roupas dentro de um recipiente adequado, denominado cesto, misturando-as a uma solução de limpeza, composta geralmente de água, sabão e alvejante. Dessa forma ocorre a retirada da sujeira presente no tecido por ação mecânica, através do atrito da roupa com as demais e com as paredes do recipiente, ação química, caso da utilização de sabão e ação térmica, quando é utilizada água quente no processo [18].

A posição do eixo de rotação do cesto determina a classificação do produto se este é paralelo ou ortogonal à sua base, recebendo o nome de máquina de eixo horizontal e vertical, respectivamente, como vemos na figura 3.1.

Adicionalmente, o cesto é conectado ao gabinete, estrutura metálica que reveste o equipamento, por varetas associadas a amortecedores para redução da influência da vibração do cesto, aumentando a estabilidade do produto. Também há válvulas para controlar a entrada de água fria, que pode ser aquecida através de resistências, e quente, conforme o modelo, e bombas para executar a retirada da água ao final do período de lavagem. Estas estruturas estão evidenciadas na imagem 3.2.

O movimento do cesto é resultado da rotação de um motor a ele conectado, permitindo variações de velocidade e duração. Este movimento é responsável por girar ou o cesto como um todo ou, no caso de máquinas verticais, uma estrutura



(a) Máquina de eixo vertical



(b) Máquina de eixo horizontal

Figura 3.1: Exemplos de máquinas de lavar roupas de eixo vertical e horizontal [2]

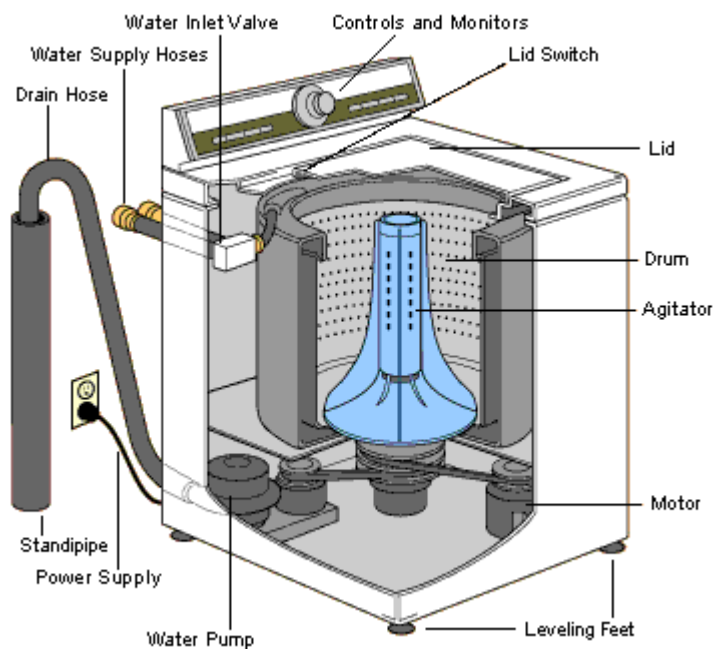


Figura 3.2: Vista em corte de uma máquina de lavar evidenciando elementos [3]

menor fixada em sua base, denominada *impeller* ou agitador conforme seu formato.

O agitador, evidenciado na figura 3.2, consiste em um cilindro de plástico proeminente responsável por promover a torção das roupas, gerando níveis maiores de atrito com o intuito de elevar a qualidade da lavagem. *Impeller* é um disco plástico que gira em ambos os sentidos de forma rápida com o objetivo de gerar um movimento convectivo que carregue as roupas da parte de baixo do cesto para cima e vice-versa; há menor contato e portanto esforços reduzidos sobre os tecidos.

Um ciclo de lavagem corresponde a combinações entre períodos conhecidos como agitação, no qual ocorre de fato a retirada da sujeira dos tecidos através da movimentação das roupas e mistura com a solução de limpeza, e um período de centrifugação, responsável pela extração da água utilizada durante a agitação. A diferença entre os períodos citados é a velocidade atingida durante a etapa, já que a fase de extração de água necessita de altas velocidades para garantir a retirada da água, deixando os tecidos tão secos quanto possível.

A agitação é constituída por sucessivas fatias de tempo divididas entre períodos estáticos e de movimento rotacional do motor, alternando o sentido de rotação ao final de cada fatia, geralmente. A relação entre pausa e movimento é chamada de *duty cycle*.

Existem diferenças consideráveis entre máquinas de eixo vertical e horizontal. As máquinas verticais, mais populares no Brasil, fornecem principalmente maior conforto de utilização, pois o usuário pode carregá-la sem necessitar abaixar-se. Por outro lado, máquinas horizontais costumam oferecer maior qualidade de lavagem e menor consumo de água [19].

3.2: Sistemas de transmissão

Assim como em um grande número de aplicações que utilizam motores elétricos, há duas formas principais de transferir a rotação do motor ao cesto de uma máquina de lavar: ligação direta ou através de correias. A primeira consiste em conectar o cesto diretamente ao eixo do motor, transmitindo o torque gerado diretamente; a seguinte utiliza um material flexível que une mecanicamente os dois eixos, transmitindo torque de um para outro baseado em uma relação conhecida.

Evidenciado na figura 3.3 visualizamos ambos os sistemas de transmissão descritos acima. O sistema de correias consiste na utilização uma ou mais polias [20] com uma determinada relação de transferência de torque ao cesto da máquina de la-

var. Por outro lado, na última década, a nova contribuição da indústria são os motores *direct drive*, isto é, conectados diretamente ao eixo do cesto.

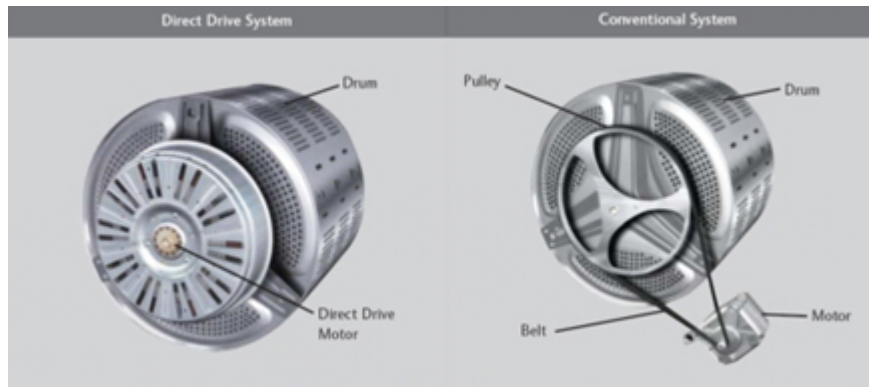


Figura 3.3: Comparação entre motores Direct Drive e com polia e correia [4]

Como será visto no próximo capítulo, foram utilizados protótipos que utilizam ambos os sistemas, portanto cabe um momento para analisarmos de forma mais próxima as vantagens e desvantagens de cada um deles.

A utilização do sistema de correias é amplamente difundida graças ao seu baixo custo e bom desempenho, apresentando eficiência de aproximadamente 95% na transferência de torque [21]. Seu princípio de funcionamento depende do tracionamento do material flexível, portanto opera adequadamente em velocidades superiores a alguns milhares de rotações por minuto ou em velocidades inferiores, desde que o torque requerido seja mais alto.

Adicionalmente, em função da relação de transferência entre as polias envolvidas, é possível converter altas velocidades no eixo do motor em velocidades menores, mas com mais capacidade de torque, no cesto da máquina; isto permite o emprego de motores mais compactos para gerar movimento.

Contudo, esta tecnologia é suscetível à variação térmica, sofrendo expansão ou contração, prejudicando o tracionamento do material e portanto sua capacidade de operação. Tal efeito também pode ser responsável por seccionar ou estender o material além de sua capacidade elástica, inutilizando-o. Sendo assim, o atrito entre correia e polia pode ser preponderante na eficiência da solução.

Há maior geração de ruído sonoro – fato merecedor de destaque se levarmos em conta as restrições do consumidor discutidas no Capítulo 2 – graças ao contato entre os elementos do sistema, mas a influência da vibração do motor no cesto e vice-versa é reduzida, pois o material flexível contribui para amortecê-lo. Finalmente, o tracionamento da correia retira parte da potência mecânica que poderia ser utilizada

pelo cesto, reduzindo a eficiência da transmissão aos 95% supracitados.

Motores *direct drive* por conectarem-se diretamente apresentam eficiência de transmissão de aproximadamente 100% já que não há nenhum outro meio interpondo-se entre o eixo do motor e do cesto da máquina de lavar. Isto traz algumas vantagens através da redução no número de peças e redução da geração de ruídos sonoros, já que não há mais o contato entre correia e polias.

Também, afirmam alguns fabricantes, como o motor está em contato direto com a carga que deve mover, é possível obter maiores informações sobre a mesma, permitindo que o ciclo de lavagem seja adaptado conforme a necessidade [4]. Isso resultaria em uma maior flexibilização e personalização do ciclo, com redução no consumo de água, já que apenas a quantidade necessária é adicionada ao sistema.

Os problemas de um motor *direct drive* estão principalmente associados com o acionamento e as dimensões do motor. Ao contrário da combinação de polias e correia, não existe maneira mecânica de alterar o torque entregue ao cesto, exigindo a aplicação de algoritmos de acionamento e controle mais elaborados, certamente aumentando o custo computacional necessário.

Uma alternativa proposta para este problema é a utilização de uma caixa de engrenagens entre o motor e a massa a ser rotacionada, permitindo a alteração da relação de transmissão e, portanto, o emprego de motores com menor torque nominal. Outra vantagem desta solução é que o motor pode ser projetado para operar numa faixa muito próxima da velocidade nominal, pois é capaz de funcionar com relação unitária em altas velocidades e utilizar a razão proporcionada pela caixa de engrenagens para rotacionar o cesto em velocidades menores, mas com alto torque.

Similarmente, como não há relação de transferência, motores *direct drive* são relativamente maiores em comparação com motores que operam com correia, pois devem necessariamente atender toda a requisição de torque feita pelo cesto de roupas. O incremento dimensional pode criar uma dificuldade no posicionamento do motor na máquina, ao limitar o tamanho máximo do cesto, pois ambos dividem espaço no gabinete.

Não há dúvidas de que ambas as tecnologias apresentam níveis adequados de eficiência, mas há uma tendência recente de divulgar aos consumidores a superioridade da segunda solução, relativamente nova no setor. Dado que suas vantagens se concretizem, isto é, aumento de flexibilidade e redução de ruído, certamente haverá grande espaço para crescimento.

3.3: Princípios fundamentais de motores elétricos

A noção básica do funcionamento de todos os motor elétrico parte de três fenômenos eletromagnéticos: a força de Laplace, a lei de Ampere e a lei de indução de Faraday [22].

O primeiro é resultado da interação entre uma corrente elétrica I e com o campo magnético B que a envolve. Essa interação é responsável pela geração de uma força F , ortogonal à direção do movimento das cargas elétricas e ao campo magnético a elas imposto. Sua magnitude é proporcional à velocidade das cargas elétricas, ao comprimento do condutor e à intensidade do campo magnético, como vemos na equação 3.1.

$$F = I \int dl \times B \quad (3.1)$$

O segundo fenômeno expõe que cargas elétricas percorrendo um condutor geram um campo magnético cuja magnitude é proporcional à sua intensidade. O terceiro explica que um condutor exposto a um campo magnético ϕ variante no tempo produzirá uma diferença de potencial ϵ em seus terminais. A intensidade dessa tensão, conhecida como força eletromotriz, é calculada através da equação 3.2.

$$\epsilon = \frac{d\phi}{dt} \quad (3.2)$$

Assim sendo, encontraremos nos motores um elemento móvel, denominado rotor por executar movimento rotacional, na maioria dos casos, e um elemento fixo, chamado estator ou armadura. Através de diferentes configurações de componentes em cada um desses elementos realiza-se a interação entre uma corrente elétrica, percorrendo enrolamentos de determinado material condutor, e um campo magnético com o intuito de gerar a supracitada força de Laplace e movimentar o rotor.

Adicionalmente, os enrolamentos são envoltos ao redor de um material ferromagnético, isto é, capaz de tornar-se um ímã quando exposto a um campo eletromagnético, geralmente ferro, potencializando o efeito do campo magnético gerado pelas correntes trifásicas. Esta estrutura recebe o nome de núcleo magnético ou, simplesmente, o ferro do motor.

Portanto, apesar de operarem sobre os mesmo princípios fundamentais, existe

uma vasta classificação de motores elétricos baseada no arranjo construtivo de estruturas no rotor e estator e também na forma de alimentação, isto é, contínua ou alternada. Esta classificação pode ser observada na figura 3.4.

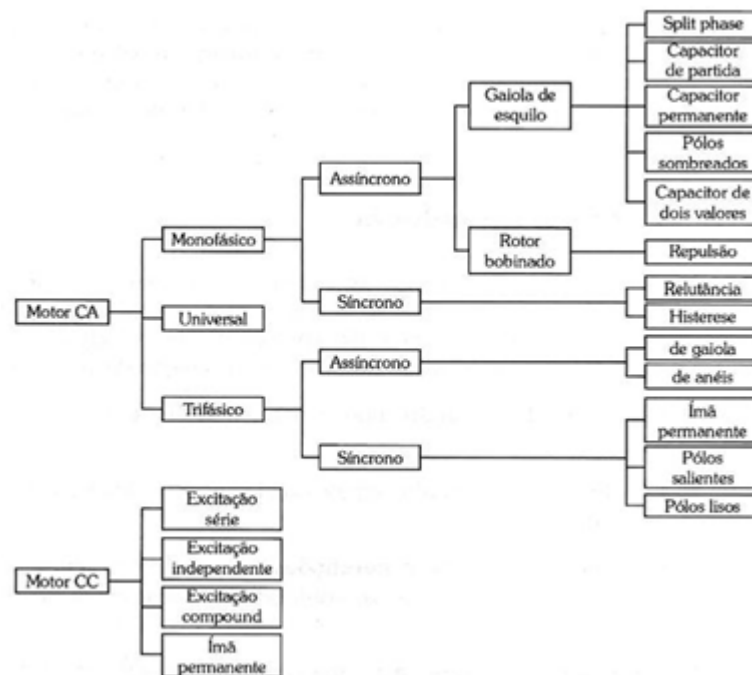


Figura 3.4: Árvore de classificação de motores elétricos [5]

Ambos os motores utilizados na execução desse projeto são motores alimentados por corrente alternada trifásica, síncronos e com ímãs permanentes. Seu movimento é fruto da interação entre o campo magnético gerado pelos ímãs, fixados ao rotor, e o campo magnético gerado pelas correntes percorrendo os enrolamentos de condutores correspondentes às três fases elétricas. O rotor pode ser tanto interno ou externo ao estator, modificando diversas características, incluindo as térmicas, discutidas no próximo capítulo.

A caracterização como síncrona provém do fato de que o campo magnético gerado pelo rotor desenvolve a mesma velocidade rotacional que o campo magnético induzido pelas correntes percorrendo os enrolamentos, não apresentando o fenômeno conhecido como escorregamento.

Mais precisamente, o campo magnético do rotor acompanha um “campo girante”, fruto da alimentação trifásica dos enrolamentos ou bobinas e da disposição física de 120° entre elas [6], como mostrado na figura 3.5. Ressaltando que a imagem apresenta um motor com 2 pares de polos, ou seja, para cada fase da alimentação há quatro enrolamentos, mas este número pode sofrer grande variação.

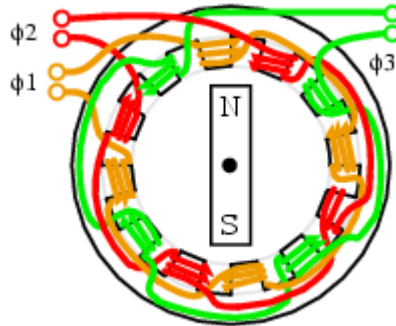


Figura 3.5: Disposição dos enrolamentos trifásicos [6]

Se calcularmos vetorialmente a corrente resultante entre as três, verificaremos que a resultante apresenta um comportamento rotacional e, portanto, recebe o nome de campo girante, como visível na figura 3.6. Sendo assim, o alinhamento do campo do rotor com este campo induzido pelas correntes de alimentação gera o movimento necessário para a operação do motor. A velocidade ω atingida é calculada pela equação 3.3, na qual f é a frequência da fonte de alimentação e p é o número de polos por fase.

$$\omega = \frac{120 * f}{p} \quad (3.3)$$

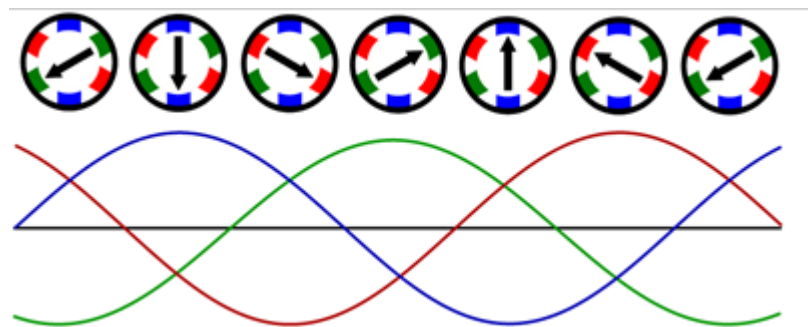


Figura 3.6: Representação do campo girante [7]

Em aplicações domésticas, como é o caso das máquinas de lavar, o acionamento de um motor trifásico é feita através de um inversor de frequência. A tensão monofásica da rede elétrica é então retificada e convertida em um sinal senoidal, através da ação de um microcontrolador agindo sobre uma ponte de transistores, similar a apresentada na figura 3.7. Como a frequência do sinal gerado é variável, é possível operar o motor síncrono em toda a sua faixa de operação, inclusive em sua partida.

Finalmente, apesar de apresentarem uma maior complexidade construtiva e

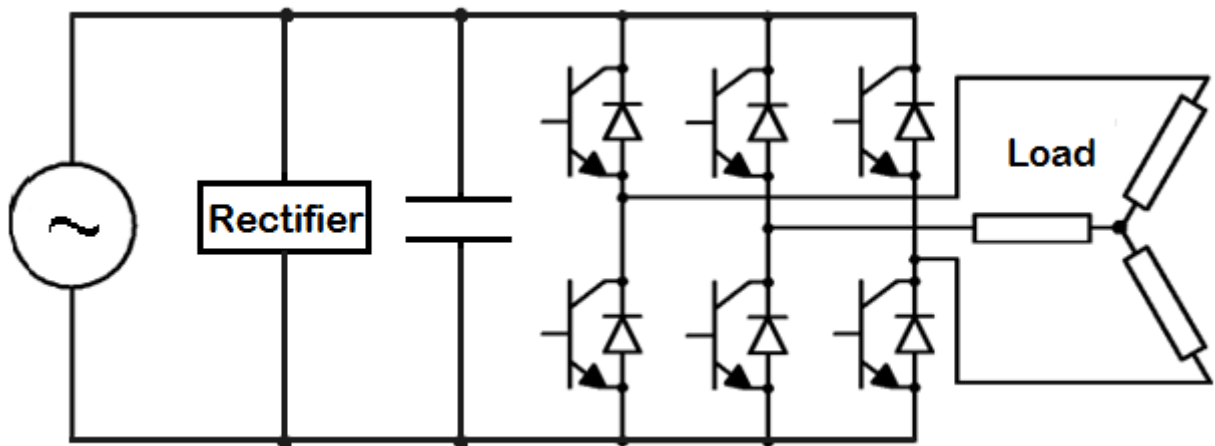


Figura 3.7: Inversor de frequência

precisarem um método externo de partida, como um inversor, tais motores têm grande espaço na indústria [23] pelos fatores apresentados a seguir:

- não há aplicação de energia para geração do campo do rotor, reduzindo perdas e aumentando a eficiência;
- maior densidade de potência e/ou torque que na excitação eletromagnética;
- melhor característica dinâmica pela maior densidade de fluxo;
- redução do período de manutenção pela inexistência de escovas e outros contatos, responsáveis por 90% da manutenção rotineira em motores.

3.4: Modelo e controle de motores de ímãs permanentes

Esta seção tem a função de apresentar o modelo matemático do motor a ímãs permanentes e a estrutura de controle utilizada de forma a aumentar a compreensão sobre a influência da resistência sobre ambos. Espera-se portanto que a motivação para este projeto seja fortalecida.

O desenvolvimento do modelo do motor em questão vem da inferência [24] de que a tensão nos terminais de cada bobina, V_x , onde x representa cada uma das fases elétricas, é igual a soma da queda de tensão devido à corrente i_x percorrendo seus enrolamentos e da tensão gerada pela variação do fluxo do rotor, a qual é responsável pela indução da força contra eletromotriz nas bobinas, como vemos na

equação abaixo. O subíndice s está relacionado a variáveis e parâmetros do estator e o subíndice r ao rotor.

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{sa} & 0 & 0 \\ 0 & R_{sb} & 0 \\ 0 & 0 & R_{sc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{bmatrix} \quad (3.4)$$

O fluxo no motor de ímãs permanentes é calculado através da equação 3.5. O termo L_x representa as indutâncias de cada bobina, sendo x uma das três fases do equipamento, e o termo L_{xy} , a indutância mútua entre duas bobinas distintas, sendo x e y uma das fases a , b e c do motor, parâmetro que é variável em função da posição angular rotor e, portanto, do tempo. Esta variação é senoidal, tornando o modelo do motor não-linear e de difícil solução. Os termos ψ_r representam o fluxo gerado pelos ímãs e que também são uma função da posição do rotor em relação às fases do motor.

$$\begin{bmatrix} \psi_{sa} \\ \psi_{sb} \\ \psi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_a & L_{ab} & L_{ac} \\ L_{ab} & L_b & L_{bc} \\ L_{ac} & L_{bc} & L_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{ra} \\ \psi_{rb} \\ \psi_{rc} \end{bmatrix} \quad (3.5)$$

Como podemos verificar, o modelo é profundamente dependente da resistência do estator, especialmente em baixas velocidades. Quando a velocidade tende a zero e há pouca variação no sistema, a dinâmica do sistema é governada simplesmente pela energia dissipada na resistência de cada bobina, de forma que alterações consideráveis no seu valor podem alterar o comportamento do motor em grande intensidade.

Contudo, a influência da resistência também se estende ao controle do motor, dependendo da estrutura utilizada. Tomando como exemplo o DFTC (controle direto de fluxo e torque, na sigla em inglês), estrutura de controle que utiliza uma série de transformações matemáticas que simplificam o modelo do motor, reduzindo-o a um par de eixos de referência [8].

Um eixo é estacionário em relação ao rotor e o outro é referenciado em relação ao campo girante, a diferença entre ambos é denominada ângulo de carga, descrito na figura acima por δ . O modelo do motor transformado é representado nas equações abaixo, sendo T o torque desenvolvido pelo motor.

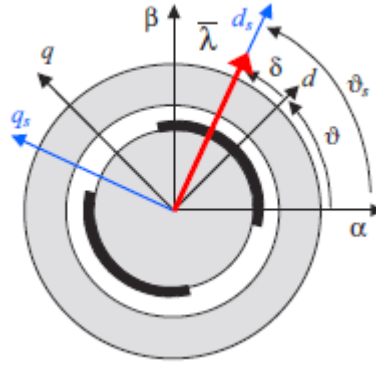


Figura 3.8: Eixos de referência após transformações matemáticas no modelo do motor [8]

$$\begin{aligned}
 \frac{d\psi}{dt} &= -R_s i_s + v_d s \\
 \frac{d\delta}{dt} &= -R_s i_q s + v_q s - \omega \psi \\
 T &= \frac{3}{2} \frac{p}{L_s} \psi_r \sin(\delta)
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

A conveniência da sequência de transformações matemáticas torna-se mais evidente ao observarmos que o fluxo do motor pode ser controlado apenas pelo eixo direto, representado pelo subíndice d , com a queda de tensão na resistência surgindo como uma perturbação. Já o ângulo de carga é controlado apenas pelo eixo de quadratura, subíndice q , permitindo que controladores simples do tipo proporcional-integral sejam utilizados de forma independente entre si. O torque é função do número de par de polos, fluxo dos ímãs e do campo girante e do seno do ângulo de carga.

Naturalmente, por questões de robustez e pela ausência de sensores capazes de medir certas variáveis de interesse, a estrutura completa de controle inclui observadores responsáveis por estimá-las [25], como podemos ver na figura abaixo. Como o torque é função do ângulo de carga, atingindo valores máximos quando $\delta = \frac{\pi}{2}$, e buscamos entregar o máximo de torque, especialmente na partida do motor quando a inércia é maior, há especificamente um estimador deste ângulo.

Resumidamente, o ângulo de carga consiste na diferença angular entre os dois sistemas de orientação apresentados na figura 3.8 e, para tal, necessitamos definir qual o fluxo do rotor para podermos posicioná-lo em relação ao eixo do estator. Uma forma alternativa ao cálculo do fluxo é estimar a força contra eletromotriz, derivada da equação 3.6, que é dependente da tensão de alimentação e da diferença de potencial nos terminais das bobinas.

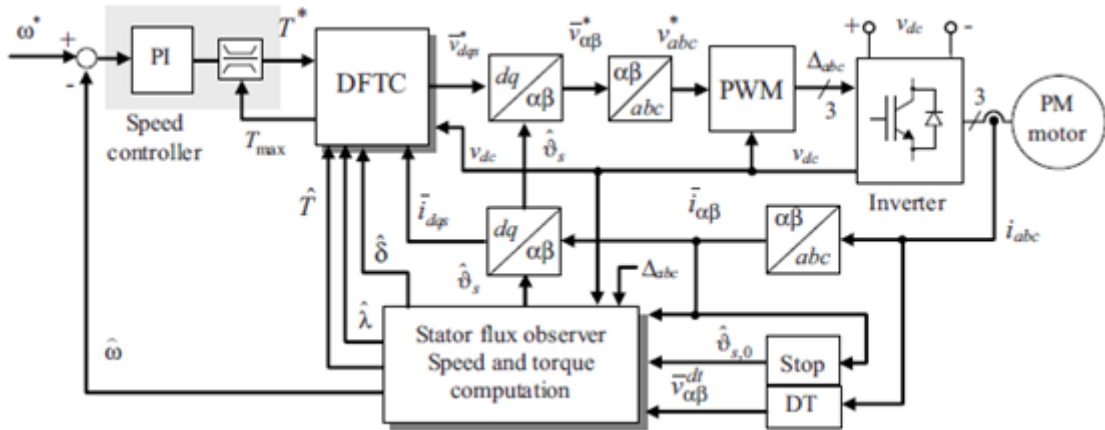


Figura 3.9: Estrutura de controle do método DTFC [8]

Claramente, podemos concluir que uma má medição do parâmetro de resistência resulta em uma estimativa errônea da força contra eletromotriz, o que pode levar a um erro considerável no cálculo do ângulo de carga. Por sua vez, essa propagação de erros pode limitar o torque disponível ao motor e gerar problemas de partidas ou durante sua rotação.

Logo, esta variável assume fundamental importância no controle do motor e o conhecimento do seu valor permite obter um comportamento robusto. Como o valor de resistência dos condutores é função da temperatura, como pode-se verificar na equação 4.3, utilizaremos um modelo térmico, apresentado no próximo capítulo, para avaliar a temperatura do motor e, em seguida, estimar o valor da resistência. Este modelo relaciona fenômenos de geração e transferência de calor na estrutura do motor para estimar sua temperatura e, por conseguinte, resistência de forma adequada.

Capítulo 4: Modelo Térmico

O objetivo deste capítulo é apresentar a base teórica que fundamenta o desenvolvimento do modelo térmico de um motor e, em seguida, apresentar as ferramentas utilizadas no processo de modelagem, geração de equações e sua transformação em código executável em plataforma embarcada.

Inicialmente, no entanto, será apresentado o método utilizado atualmente pela Whirlpool como solução para a medição de resistência, além de técnicas utilizadas ou patenteadas por outras empresas do ramo de eletrodomésticos e da indústria como um todo. A seguir, apresentar-se-á o conteúdo do modelo térmico e sua aplicação na estrutura microcontrolada de uma máquina de lavar.

Esta revisão teórica foi desenvolvida como uma das atividades do período de estágio com o intuito de explorar não só a indústria como um todo, mas as soluções propostas pela Whirlpool, utilizando como base documentos internos da empresa, reutilizando o conhecimento, patentes de diversas empresas e literatura disponível, especialmente sobre a parte de modelagem térmica e fenômenos de transferência de calor.

Ressaltando que a técnica de medição de resistência estava desenvolvida anteriormente ao início do estágio relatado nesse documento, como parte das atividades do grupo de Motor Control, e a geração do modelo térmico dos motores empregados, executada por especialistas na área de ciências térmicas da empresa, ocorreu paralelamente ao estágio seguindo os passos descritos neste capítulo.

4.1: Tecnologias utilizadas na indústria

Não é tarefa simples descobrir quais técnicas e métodos cada empresa utiliza, pois esses são mantidos em segredo por seu caráter muitas vezes estratégico. Abrir mão do sigilo significaria perder um importante ponto de vantagem no mercado, justificando os obstáculos existentes em associar uma determinada tecnologia com a empresa que a emprega, a não ser por um eventual nome comercial da solução, o qual não permite inferir maiores detalhes.

Uma busca na literatura permite concluir que a medição ou estimativa de tem-

peratura em motores tem relação principalmente com a manutenção preventiva e, portanto, aumento da vida útil desses equipamentos. Como níveis intensos de temperatura significam desgaste da isolação dos fios condutores que compõem uma bobina, evitar que tais níveis sejam atingidos é absolutamente desejável.

As três formas principais para esta ação são a medição direta com sensores, estimação baseada em modelos térmicos e estimação baseada na observação de parâmetros do motor[26].

A princípio, a medição é o método mais direto e que requer a menor capacidade técnica para sua utilização. Contudo sensores são corpos físicos limitados a uma pequena porção do motor e há uma chance considerável que não sejam capazes de avaliar todos os gradientes térmicos, visto que a temperatura do motor é apenas uma abstração do fato que cada seção desse equipamento pode apresentar variações durante a operação. Adicionalmente, essa técnica só é válida financeiramente para atuadores maiores, já que posicionar sensores em pequenos equipamentos é caro e elaborado.

A utilização de um modelo térmico consiste em medir as correntes de cada fase do motor e calcular aproximadamente as perdas relacionadas a tais níveis de corrente elétrica e qual a quantidade de calor gerada. Em seguida, utilizando uma representação matemática dos mecanismos de transferência de calor entre elementos do motor, estimar a temperatura do equipamento. Apesar de ser bastante robusto, esse método tem um custo computacional mais alto e, no caso de alterações físicas do motor durante a operação, pode não ser mais capaz de gerar informações válidas.

A observação de parâmetros, especialmente a resistência, permite indiretamente inferir sobre a temperatura dos enrolamentos de um motor. Ainda é possível utilizar como base variáveis que sejam função da resistência e só então realizar a conversão para temperatura. Tal método apresenta resultados bastante satisfatórios, mas como veremos na próxima seção, há desvantagens em seu uso no setor de eletrodomésticos.

No entanto, há outras formas de verificar a existência das supracitadas técnicas através de um processo de análise dos produtos, controlando entradas e verificando saídas em determinadas etapas, de forma a obter não só a confirmação da existência de certas funcionalidades, mas também o algoritmo utilizado de forma aproximada.

Um exemplo dessa abordagem pode ser visto na figura 4.1, que apresenta gráficos relativos à velocidade de rotação do motor e às temperaturas de cada uma de

suas fases. Verifica-se que durante o ciclo de lavação de uma máquina de lavar, produzida por uma empresa concorrente, o comportamento do motor sofre alterações conforme a sua temperatura varia, limitando-se a um valor próximo de 110°C. A mudança de comportamento em questão corresponde a variar o *duty cycle*, durante a fase de agitação, de 11 segundos em movimento a cada 24 segundos para 9 segundos a cada 21 segundos, agitando por menos tempo mas mais frequentemente.

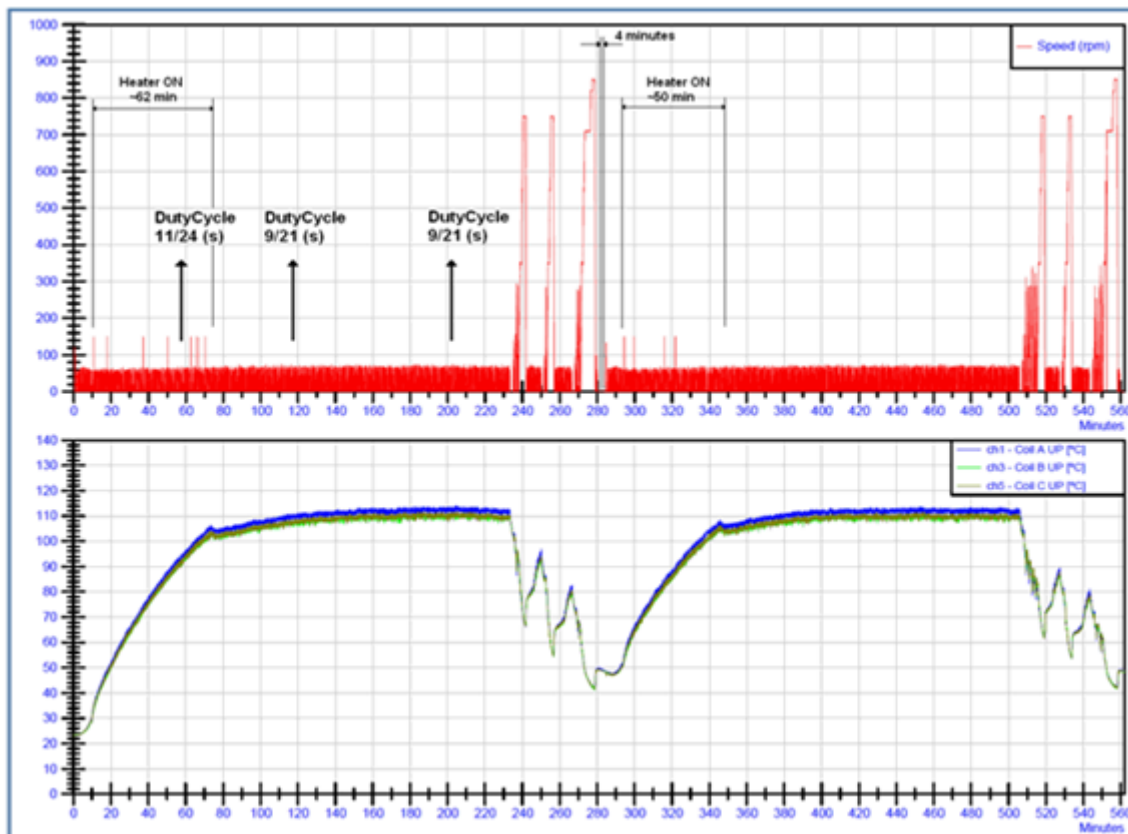


Figura 4.1: Adaptação de ciclo em função da temperatura [9]

Deduz-se portanto a existência de um método de verificar a temperatura deste motor por parte da unidade de controle do produto. Partindo do fato de que inexistente um sensor de temperatura físico nas proximidades do motor, apenas pode-se concluir que há uma alternativa de estimação do parâmetro. Investigações mais profundas devem ser executadas para apoiar essa afirmação e avaliar seu algoritmo, mas não serão foco dos parágrafos a seguir.

A pesquisa também pode prosseguir através da busca de patentes associadas ao tópico. Evidentemente, a existência de uma patente não implica a utilização da tecnologia reivindicada, mas permite gerar conhecimento sobre o estado da prática e tendências existentes. Dessa forma, executou-se uma pesquisa sobre patentes relacionadas a estimação de temperatura de motores elétricos, pois esta permite estimar

a resistência.

A complexidade dos resultados encontrados varia consideravelmente em função do escopo da descoberta e da indústria, mas há duas abordagens principais, em acordo com o descrito no começo da seção. Na primeira observa-se um ou mais parâmetros que sofram influência direta ou indireta da resistência e através de uma relação conhecida infere-se qual o valor de resistência responsável por alterações no parâmetro estudado e, por conseguinte, a temperatura.

A segunda consiste em utilizar um modelo térmico do motor e, em posse de variáveis de entrada como tensão e corrente que este consome, estima-se como a temperatura deve variar a partir de um valor de referência.

No primeiro grupo encontramos empresas como Azure Dynamics, desenvolvedora de sistemas de acionamento elétricos e híbridos para veículos comerciais; General Electrics, presente em diferentes setores da indústria, inclusive em eletrodomésticos; Motorola, especializa em eletrônica e telecomunicações; Samsung, também presente em diversos setores, além do setor de eletrodomésticos; Allen Bradley, empresa cujo atuação está a área de automação industrial.

A General Electrics parte da fundamentação que o escorregamento, isto é, diferença entre sua velocidade real e a velocidade síncrona, de um motor a indução é função da temperatura e ao comparar-se o torque estimado com o torque atingido para um mesmo valor de escorregamento é possível estimar corretamente o valor de temperatura [27]. Como não há esse fenômeno em um motor a imãs permanentes, por sua característica síncrona, essa solução não é aplicável.

As demais empresas utilizam equações matemáticas envolvendo correntes, fluxo magnético e tensões do motor para resolver o valor de resistência, como a Samsung ou Allen Bradley, que utilizam correntes e tensões dos eixos de quadratura e direto para inferir o parâmetro desejado [28, 29].

Também é possível, com o auxílio de perfis de variação de corrente, medir variações de fluxo magnético e convertê-la, utilizando as correntes de alimentação, em um incremento ou decremento na resistência padrão [30], como realizado pela Motorola, ou avaliar a resistência das bobinas através da constante de tempo em transitórios de fluxo [31].

No segundo grupo de empresas, isto é, que utilizam modelos térmicos encontram-se Fuji Electric, focada na instrumentação de processos industriais; General Motors,

fabricante de carros; Toyota, igualmente participante do mercado automotivo. Interessante apontar que apesar de notoriamente conhecidas por seus automóveis movidos a combustão, as empresas automotivas citadas realizam pesquisas para aprimorar a utilização dos motores elétricos já empregados atualmente.

Por exemplo, a General Motors apresenta uma patente para motores a ímã permanente cuja temperatura é calculada através da modelagem de seções do motor, como a Whirlpool, que comunicam-se com os demais através de caminhos de transferência térmica, ou seja, representações matemáticas dos processos de transferência de calor [32], descritos ainda nesse capítulo. O resultado final deste modelo é uma sequência de equações de balanço térmico que permitem avaliar a temperatura dos enrolamentos do motor.

De forma mais simples, a solução da Toyota utiliza um sensor de temperatura ambiente e a conversão, através de parâmetros estáticos, desta temperatura em valores aproximados dos existentes no motor real [33]. Essa abordagem, no entanto, funciona apenas pela existência de um sensor e de espaço adequado para o seu posicionamento, fatos nem sempre condizentes com a realidade industrial.

A última invenção consiste em comparar um modelo pré-definido do comportamento da corrente de alimentação do motor e seu valor medido por transdutores [34]. A diferença entre ambos fornece a informação de uma variação de resistência, permitindo a atualização do seu valor no algoritmo utilizado.

4.2: Medição de resistência

Como visto no capítulo anterior, o valor da resistência dos enrolamentos do motor desempenha um papel primordial na execução eficiente da estrutura de controle, portanto cabe ressaltar que o foco do projeto não consiste em estimá-la única e exclusivamente. Não medi-la significaria perder uma importante conexão com o sistema físico e, por conseguinte, reduzir sua eficiência e capacidade de atender às especificações do produto.

O método atual, portanto, consiste na medição da resistência a dois fios, ou seja, uma diferença de potencial é imposta entre duas fases do motor e a corrente elétrica resultante é medida. Através da relação entre tensão e corrente pode-se calcular o valor da resistência e alimentar a estrutura de controle com seu valor.

A medição da corrente resultante ocorre em transdutores de corrente localizados em cada fase, ou braço, do inversor de frequência, responsável pelo movimento do motor, como pode-se ver na figura 4.2. Como a tensão é imposta entre dois enrolamentos, a resistência medida é de linha, ou seja, duas vezes o valor de resistência de um único enrolamento, considerando-se que as resistências dos enrolamentos tem valor igual.

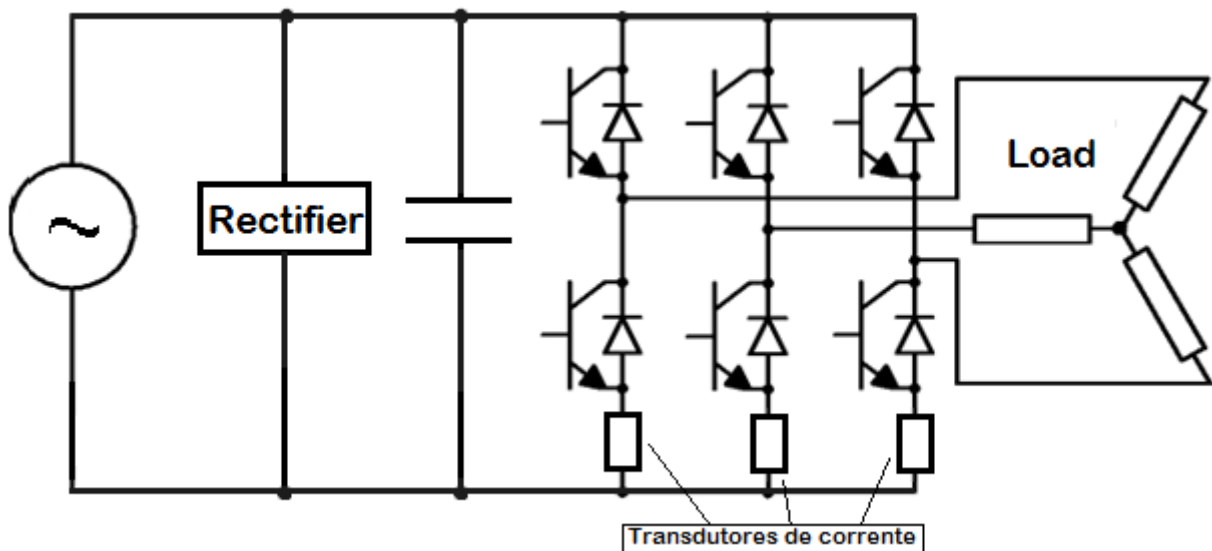


Figura 4.2: Inversor de frequência salientando transdutores de corrente

Há um erro associado a este tipo de medição, pois a própria resistência dos condutores que conectam o inverso e o motor é responsável por uma queda de tensão. Esta queda de tensão acarreta uma atenuação na intensidade da corrente elétrica sendo interpretada como uma variação positiva da resistência, a qual pode ser significativa se a resistência real do motor apresentar um valor baixo, de algumas unidades de ohms, podendo ser necessária sua compensação subtraindo seu valor após a medição.

A injeção de corrente também gera o aquecimento das bobinas do motor, que por sua vez significa um aumento da resistência, num caso claro em que o sistema de medição interfere na variável sendo medida. Adicionalmente, os transistores do inversor de frequência responsáveis por controlar a injeção de corrente também geram uma queda de tensão constante quando expostos a uma diferença de potencial, novamente permitindo um erro de medição [9]. Contudo, esse fenômeno pode ser corrigido utilizando dois patamares diferentes de tensão, assumindo que o valor de tensão é resultado da soma da queda de tensão nos enrolamentos do motor e nos transistores, como vemos na equação 4.1.

$$\begin{aligned} V_1 + V_{i\text{ransistor}} &= R_{\text{linha}} I_{1.\text{medido}} \\ V_2 + V_{i\text{ransistor}} &= R_{\text{linha}} I_{2.\text{medido}} \end{aligned} \quad (4.1)$$

Subtraindo-se as equações acima, obtém-se:

$$R_{\text{linha}} = \frac{(V_1 + V_{\text{transistor}}) - (V_2 + V_{\text{transistor}})}{I_{1.\text{medido}} - I_{2.\text{medido}}} = \frac{V_1 - V_2}{I_{1.\text{medido}} - I_{2.\text{medido}}} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (4.2)$$

Outro ponto de interesse neste método refere-se à fase na qual é injetada a corrente. Há duas possibilidades de execução do método: injetar correntes exclusivamente uma fase ou alterar a fase utilizada a cada medição. O segundo método é preferível por permitir o aquecimento simétrico do motor e, por conseguinte, evitar o desgaste excessivo de apenas um enrolamento.

Através da medida de resistência, podemos calcular a temperatura T do motor a partir da equação 4.3. R_{base} refere-se ao valor de referência de resistência medido na temperatura T_{base} [35]. A variação da temperatura depende do coeficiente de variação térmica do material que compõe os enrolamentos.

$$R = R_{\text{base}}(1 + \alpha T) \quad (4.3)$$

Esta solução, no entanto, conta com algumas características que resultam em redução da eficiência do sistema como um todo:

- a injeção de correntes elétricas no motor provocam seu aquecimento, já que por efeito Joule ocorre a conversão de potência elétrica em térmica, reduzindo a vida útil da isolamento das bobinas e do equipamento;
- a injeção de corrente caracteriza um gasto energético sem relação com a função de limpeza e, portanto, que não agrega valor junto ao consumidor;
- a medição deve ocorrer com o motor completamente parado, pois o movimento do rotor gera variações de fluxo que interferem com a corrente injetada, de forma que necessita-se adicionar ao ciclo de lavagem um período estático e sem finalidade de limpeza.

Dessa forma, fica claro que, apesar de necessário para o andamento correto da estrutura de controle, o método utilizado apresenta desvantagens importantes e

recorrer a ele constantemente fere a eficiência do equipamento. Portanto, ainda que não o substitua completamente, o modelo térmico traz consigo a correção de alguns pontos apresentados nessa seção.

4.3: Elementos do modelo térmico

O objetivo do modelo térmico é representar os fenômenos de geração e transferência de calor na estrutura do motor de ímãs permanentes. Com abordagens de diferentes níveis de complexidade e utilizando métodos de simulação ou resolvendo as equações que regem tais fenômenos analiticamente é possível atingir o resultado desejado.

A modelagem da estrutura do motor foi realizada utilizando um circuito equivalente de forma análoga a um circuito elétrico [36], de forma que se pode inclusive traçar o paralelo entre variáveis das duas áreas, como vemos na tabela 4.1. Nesta modelagem, fontes geradoras de calor, fenômenos de transferência térmica e seções do motor com temperatura homogênea são caracterizados como elementos únicos e finitos relacionando-se em par com os demais elementos do circuito.

	Elétrico	Térmico
Fluxo	Fluxo Térmico $Q[W]$	Corrente $I [A]$
Potencial	Temperatura $T [^{\circ}C]$	Tensão $V [V]$
Resistência	$R_t = \frac{\Delta T}{Q} [\frac{^{\circ}C}{W}]$	$R = \frac{\Delta V}{I} [\frac{V}{A}]$
Condutividade	$\lambda [\frac{W}{m^{\circ}C}]$	$\sigma [\frac{S}{m}]$

Tabela 4.1: Comparação entre diferentes tecnologias de motores elétricos.

O calor é fruto das não-idealidades do motor, responsáveis por suas perdas mecânicas, elétricas e magnéticas, como a conversão de parte da energia da corrente elétrica nos enrolamentos em energia térmica, isto é, perdas ôhmicas. A transferência de calor entre partes do equipamento ocorre em função do gradiente térmico, isto é, diferença de temperatura entre elas, por ação dos fenômenos de condução e convecção.

Dessa forma, perdas no motor são caracterizadas como fontes, convecção e condução como resistências térmicas baseadas em geometria do material, condutividade térmica e coeficiente de transferência por convecção. No caso do estudo de transitórios, também é necessária a adição de capacitâncias térmicas, isto é, seções do motor que armazenam energia em função de sua massa, densidade e calor es-

pecífico. De forma geral, essa estrutura representa seções do motor termicamente homogêneas para serem definidas como um elemento.

4.3.1: Perdas em um motor elétrico

As perdas eletromagnéticas representam a maior porção das perdas totais nos motores modernos e estão relacionadas ao fluxo de corrente nos enrolamentos e a variações na capacidade magnética do motor [37].

O fluxo de corrente é responsável por dois fenômenos, que contribuem em perda de eficiência do motor, perdas no cobre e corrente de Foucault ou parasitas.

No primeiro caso, há as perdas nos condutores, geralmente cobre ou alumínio, caracterizadas pela conversão de parte da energia da corrente elétrica em energia térmica obedecendo a equação 4.4 por efeito Joule ou perdas resistivas, fruto da colisão dos elétrons que forma a corrente com os átomos do condutor e consequente transferência de energia cinética. Para correntes alternadas utiliza-se a corrente RMS para o cálculo.

$$P_{perdasCobre} = I^2 R \quad (4.4)$$

Correntes parasitas são fruto da indução de uma corrente elétrica em um condutor envolto por um campo magnético variante no tempo, como já descrito neste documento anteriormente. Esta corrente apresentará certa direção de forma que o campo magnético resultante de sua existência oponha-se ao campo magnético inicial que a gerou. De forma similar à perda no cobre, as correntes parasitas também geram calor por perdas resistivas.

Seu comportamento, contudo, é consideravelmente mais complexo e é função da frequência da variação do fluxo, fluxo magnético máximo, volume do condutor, entre outros. Para reduzir seu efeito é necessário tornar a resistência elétrica na direção do fluxo de corrente tão grande quanto possível.

Há também duas perdas geradas por efeito magnético fruto da existência de histerese e saturação do núcleo magnético [36]. Ambas são resultado do alinhamento dos ímãs do rotor com o campo magnético gerado pelas correntes elétricas percorrendo os enrolamentos.

A cada mudança na direção da magnetização em um material ferromagnético,

também mudam os domínios magnéticos, regiões com magnetização uniforme, em seu interior. Essa mudança, chamada de perdas por histerese, consome uma certa potência e gera calor, função da densidade de fluxo magnético, volume do material e constantes físicas dependentes do material. Naturalmente, como cada mudança consome uma quantidade definida de energia, quanto maior a frequência rotacional do motor, maior é a frequência do alinhamento dos domínios magnéticos e, portanto, maiores as perdas.

A saturação do núcleo magnético está relacionada com o fato de que após determinado patamar, um aumento no nível de corrente e, conseqüentemente do fluxo, nos enrolamentos do motor não gera um acréscimo no nível de magnetização do ferro. Isto ocorre, pois o campo magnético gerado pela corrente após o patamar não contribui mais para o alinhamento dos domínios magnéticos dos ímãs, pois a grande maioria deles já está devidamente alinhada. O fenômeno de saturação além de gerar aquecimento do motor, pois a corrente é maior do que deveria, também pode acarretar no aparecimento de harmônicas, que prejudicam seu funcionamento.

As perdas mecânicas [37] estão relacionadas ao atrito entre as partes móveis do motor, tal como o eixo e os rolamentos ou correias, mas podem ser reduzidas através do uso de lubrificação, mas nunca totalmente eliminadas. Há também uma perda relacionada ao entreferro, espaço cheio de fluido situado entre o estator e o rotor com dimensões variáveis em função do motor. O fluido em questão, geralmente ar, apresenta a velocidade do rotor na superfície deste e é estático na superfície do rotor; esta diferença de perfil de velocidade gera um torque de arrasto e perdas por atrito.

4.3.2: Transferência de calor

Há três mecanismos de transferência principais de calor: condução, convecção e irradiação. Relacionados, respectivamente, com a transferência de calor entre sólidos, entre um sólido e um fluido em movimento e a transferência de energia por ondas eletromagnéticas. No entanto, a radiação não contribui de forma notável em motores elétricos, podendo ser desconsiderada.

Como supracitado, a condução se dá em um material sólido pela existência de um gradiente de temperatura ΔT e obedece a Lei de Fourier, equação 4.5, que relaciona a quantidade de calor transferida com o gradiente de temperatura, a área A do sólido, sua condutividade térmica λ e a distância Δx percorrida pelo fluxo de calor

[36].

$$Q = -\lambda A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (4.5)$$

O sinal negativo na equação implica que a transferência ocorre em direção ao decréscimo de temperatura, ou seja, do corpo mais quente ao mais frio até que seja atingido o equilíbrio térmico. No motor a ímãs permanentes este fenômeno ocorre entre todas as seções do motor que estejam em contato, isto é, enrolamentos, ferro, carcaça, estator, com diferentes coeficientes de transferência.

A transferência por convecção ocorre entre um sólido e um fluido em movimento e é dividida em duas categorias: natural e forçada. Vale ressaltar que existe condução entre sólidos e fluidos, mas em menor amplitude. Este fenômeno ocorre na superfície externa (quando o rotor é externo) do motor, entreferro e dutos de resfriamento [36].

A convecção de forma natural ocorre por efeito do empuxo, pois o fluido na proximidade do sólido aumenta sua temperatura, torna-se menos denso e, ao ser empurrado para cima, é substituído por outro mais denso. A convecção forçada ocorre por ação de um meio externo como uma bomba ou ventilador, com a intenção de aumentar o fluxo do fluido e, por conseguinte, a eficiência da troca térmica.

4.4: Modelagem do comportamento térmico

O modelo térmico do motor é intrinsecamente dependente do fluxo de calor através da estrutura do motor. A combinação da sua eficiência e, por relação direta, do percentual da energia fornecida transformada em calor e sua capacidade da estrutura do equipamento em conduzi-la e dissipa-la define o seu comportamento térmico.

Contudo, a modelagem e solução analítica das equações que regem tal comportamento certamente não são tarefas triviais e demasiadamente suscetíveis a erros. Seria necessário um número considerável de experimentos para verificar, para cada motor, os coeficientes de transferência entre cada elemento que o forma e, em seguida, formular diversas equações diferenciais. Logo, um caminho alternativo é tomado neste projeto.

Um modelo preliminar foi desenvolvido, por especialistas na área de ciências térmicas, no software Dymola, que utiliza a linguagem Modelica, representando as principais capacitâncias térmicas do motor, isto é, massas com capacidade de arma-

zenar energia durante o transitório e liberá-la posteriormente; resistências, relacionadas à transferência de calor; e fontes de calor, já citadas como as perdas de um motor elétrico. A entrada para esta etapa foram parâmetros já conhecidos do motor, como massa e tipo de seus componentes, dimensões, número de espiras no enrolamento, entre outros.

A linguagem Modelica é não-proprietária e orientada a objetos, representados por equações matemáticas, cujo objetivo é a criação de modelos de sistemas físicos complexos, isto é, mecânicos, eletroeletrônicos, pneumáticos e hidráulicos, entre outros, convenientemente interconectados. Isto permite, por exemplo, modelar tanto o comportamento elétrico quanto térmico de um motor em um mesmo diagrama.

O modelo então é simplificado, reduzindo sua estratificação, ou seja, agrupando elementos com comportamento semelhante e tomando apenas o valor médio deles como representativo do todo, tornando menor o número de equações que regem seu comportamento, como vemos na figura 4.3. Pode-se visualizar as massas térmicas, representadas pelas circunferências, e as resistências, representadas pelos retângulos cinzas.

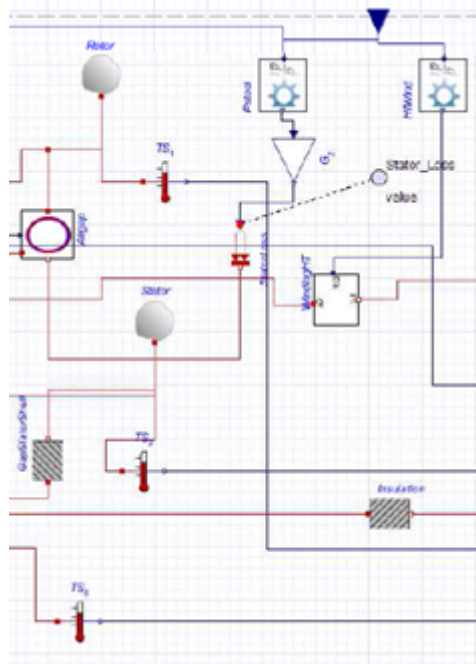


Figura 4.3: Modelo térmico no software Dymola [9]

Em seguida, resultados experimentais são obtidos, através da medição de pontos específicos do motor e em diferentes perfis de movimento e resfriamento natural e comparados com os resultados simulados através do software Dymola.

Eventuais discrepâncias são corrigidas aplicando um algoritmo de otimização

sobre o modelo, atualizando os valores de coeficientes de transferência, de forma a aproximar as informações obtidas empiricamente e estimadas. Após esse procedimento, o software já é capaz de gerar equações diferenciais baseadas no modelo, no total de 26, algumas das quais apresentadas na figura 4.4, a serem codificadas em plataforma embarcada, resolvidas iterativamente e comparadas em tempo de execução com a medida de sensores instalados no motor.

$$\begin{aligned}
 iRMS2(t) &= iRMS(t)^2 \\
 pTwind(t) &= Tamb(t) + \frac{5463}{20} \\
 HfGap(t) &= \left| -\frac{1769}{20000} - \frac{12539}{500000} Speed(t) + \frac{18773}{10000000000} Speed(t)^2 \right| \\
 HfIns(t) &= \left| -\frac{58301}{100000} - \frac{26457}{1000000} Speed(t) + \frac{51259}{10000000000} Speed(t)^2 \right| \\
 HfRotor(t) &= \left| -\frac{5041}{5000} - \frac{11517}{250000} Speed(t) + \frac{6409}{5000000000} Speed(t)^2 \right| \\
 HfWind(t) &= \left| -\frac{58301}{100000} - \frac{26457}{1000000} Speed(t) + \frac{51259}{10000000000} Speed(t)^2 \right| \\
 HnWind(t) &= \frac{111240533}{17750786} + \frac{35676744}{226307449} \left(|TWind(t) - pTwind(t)| + \frac{1}{10} \right)^{\frac{53857231}{296481764}} \\
 PSteel(t) &= \left| \frac{9823}{250000} Speed(t) + \frac{28027}{10000000000} Speed(t)^2 \right|
 \end{aligned}$$

Figura 4.4: Algumas das equações geradas pelo software Dymola [9]

4.5: Implementação em plataforma embarcada

Após verificação de que as equações codificadas de fato apresentam resultados aceitáveis, situados dentro das margens de tolerância de estimação, finalmente a temperatura estimada pode ser convertida em um valor de resistência e realimentada para a estrutura de controle e para as rotinas relacionadas à proteção do motor contra superaquecimento, reduzindo a necessidade da utilização da técnica de medição de resistência descrita neste capítulo.

As equações geradas são então discretizadas através da aproximação de Euler de primeira ordem, isto é, conversão do cálculo de integral por área de trapézios, para que possam ser executadas na plataforma embarcada, como visível na imagem 4.5. Estas equações são escritas em um módulo específico relativo ao modelo térmico na estrutura de software da empresa.

```

iRMS2= pow(i_RMS, 0.2e1);
pTwind= Tamb + 0.5463e4 / 0.20e2;
HfGap= fabs(-0.1769e4 / 0.20000e5 - 0.12539e5 / 0.500000e6 * Speed + 0.18773e5 / 0.10000000000e11 * pow(Speed, 0.2e1));
HfIns= fabs(-0.58301e5 / 0.100000e6 - 0.26457e5 / 0.1000000e7 * Speed + 0.51259e5 / 0.10000000000e11 * pow(Speed, 0.2e1));
HfRotor= fabs(-0.5041e4 / 0.5000e4 - 0.11517e5 / 0.250000e6 * Speed + 0.6409e4 / 0.500000000e9 * pow(Speed, 0.2e1));
HfWind= fabs(-0.58301e5 / 0.100000e6 - 0.26457e5 / 0.1000000e7 * Speed + 0.51259e5 / 0.10000000000e11 * pow(Speed, 0.2e1));
HnWind= 0.111240533e9 / 0.17750786e8 + 0.35676744e8 / 0.226307449e9 * pow(fabs(TWind - pTwind) + 0.1e1 / 0.10e2, 0.53857231e8 / 0.296481764e9);
PSteel= fabs(0.9823e4 / 0.250000e6 * Speed + 0.28027e5 / 0.10000000000e11 * pow(Speed, 0.2e1));

```

Figura 4.5: Algumas das equações diferenciais da figura 4.4 discretizadas [9]

A estrutura de programação da Whirlpool apresenta um caráter modular, com níveis diferentes de especialização, conforme se aproximam ou se afastam do usuário. Há módulos que lidam com a interface física, com o gerenciamento de ciclo e controle dos atuadores do produtos, com o envio e recebimento de comandos entre eles, permitindo que uma mudança de hardware, por exemplo, seja invisível para as camadas superiores.

De forma similar, o modelo térmico recebe as variáveis de entrada do módulo de controle, velocidade e correntes de fase, e fornece como resultado a temperatura estimada dos enrolamentos do motor. Periodicamente, são feitas medições de resistência utilizadas para atualizar o modelo.

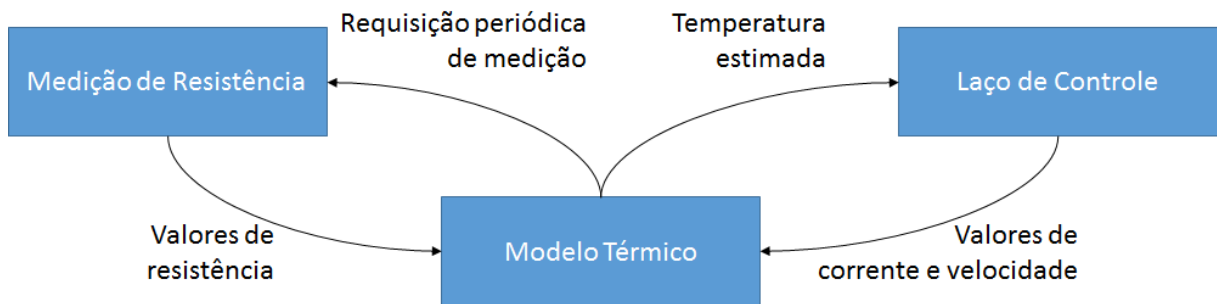


Figura 4.6: Fluxo de informação entre laço de controle, modelo térmico e rotina de medição de resistência

Estas medições tem como intuito evitar que o modelo divirja do sistema físico, de forma que a medição de resistência passa a ser o valor de referência para o modelo. O sistema como um todo passa a ter o fluxo de informação apresentado na figura 4.6.

Em um último ponto, visando aumentar a eficiência da utilização dos recursos computacionais da plataforma embarcada, as equações discretizadas e codificadas não são resolvidas em uma mesma iteração, mas são divididas em blocos. Isto garante que não serão violados os tempos definidos por outros temporizadores ou rotinas com requisitos temporais rígidos, pois o processador não é monopolizado por longos períodos de tempo para uma mesma atividade, permitindo também a utilização de temporizadores já existentes no sistema.

Capítulo 5: Desenvolvimento

O objetivo deste capítulo é apresentar as etapas necessárias para a aplicação do modelo térmico descrito no capítulo 4 na plataforma embarcada utilizada pela empresa em ambos os modelos de máquinas de lavar, horizontal e vertical. Serão tratados os tópicos de instrumentação dos motores, isto é, procedimentos realizados para a instalação dos sensores de temperatura em sua estrutura, desenvolvimento do software de aquisição de dados.

Posteriormente serão apresentados os resultados obtidos com a etapa de preparação, avaliando alguns dos ensaios realizados visando a confirmação de robustez da solução apresentada, e dados comparando a estimação do modelo térmico com a medição de temperatura tanto através da resistência como por sensores de temperatura.

Todas as atividades descritas nesse capítulo foram executadas ao longo do estágio, de forma total ou parcial. Alguns dos ensaios, no entanto, relativos à calibração e verificação do modelo térmico foram executados por outros membros da equipe em laboratórios nos Estados Unidos, caso do motor A, e Europa, para o motor B, por questões práticas, como a disponibilidade de uma câmara de refrigeração para que baixas temperaturas fossem impostas às máquinas de lavar utilizadas.

Também fez parte das atribuições do estagiário o ajuste fino do algoritmo embarcado, como a adequação da implementação do algoritmo de atualização já existente ao contexto dos motores utilizados e integração do modelo térmico ao laço de controle das máquinas de lavar.

5.1: Instrumentação

Como mencionado no capítulo 3, o projeto descrito por este relatório foi executado em dois modelos distintos de máquinas de lavar, cada qual com motores a ímãs permanentes, mas com diferentes sistemas de transmissão. A máquina vertical conta com um motor com caixa de engrenagens, posteriormente denominado motor A, e a horizontal, um sistema de correia e polia, motor B.

Depois da criação do modelo térmico no software Dymola, o passo seguinte

consiste na geração de dados empíricos dos motores e calibração do modelo através de algoritmos de otimização. É, portanto, necessário empregar métodos de avaliação de temperatura do motor capazes de, dentro das margens esperadas de tolerância, produzir informações fidedignas ao comportamento térmico do motor.

Dentre os métodos existentes, utilizou-se a medição direta através de sensores, principalmente por critérios de custos, simplicidade de utilização e capacidade de abranger toda a faixa de valores que se espera medir ao longo da operação dos motores.

Entretanto, um sensor de temperatura é um corpo com dimensões várias ordens de grandeza menores que as do motor, cuja medição corresponde apenas a uma pequena parcela da estrutura total, ou seja, incapaz de avaliar os gradientes de temperatura, exemplificados na figura 5.1, existentes nos múltiplos componentes do motor estudado. Dessa forma, a solução consiste em utilizar um número maior de sensores e, ao avaliar os valores medidos por eles, estabelecer uma tendência de temperatura dos elementos do motor, que servirão como parâmetros de comparação e validação para o modelo térmico.

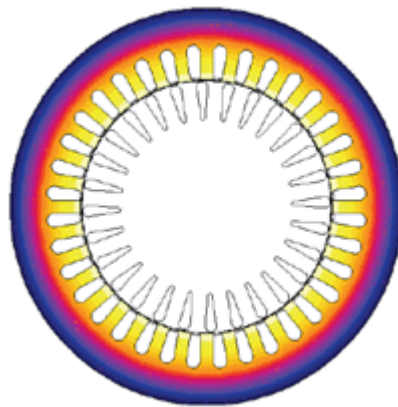


Figura 5.1: Exemplo do gradiente de temperatura no estator [10]

Naturalmente um acréscimo no número de sensores significa a necessidade de possuir uma ferramenta capaz de realizar a aquisição de dados em todos eles de forma síncrona, garantindo a confiabilidade nos dados. Sendo assim, a quantidade de sensores utilizados é resultado de um compromisso entre visibilidade do padrão térmico e viabilidade técnica da instrumentação.

Dentre as muitas opções de sensores disponíveis no mercado, foram escolhidos os termopares, especificamente do tipo T, por suas características desejáveis, como faixa de operação adequada em relação ao comportamento do motor em operação,

entre -200°C e 500°C , robustez e praticidade de aplicação. Sua composição são dois condutores de cobre e constantan.

Termopar é a denominação dada à combinação de dois condutores distintos, compostos por metais, não-metais ou ligas metálicas, unidos em uma extremidade, chamada de junta quente ou de medição, posicionada no ambiente que se deseja medir. Seu princípio funcional é o efeito de Seebeck, apresentado na figura 5.2, descoberto em 1821, o qual afirma que, em um circuito fechado formado por dois condutores diferentes, haverá a geração de uma tensão elétrica, na junta de referência ou fria, função da diferença de temperatura entre suas extremidades. [11]

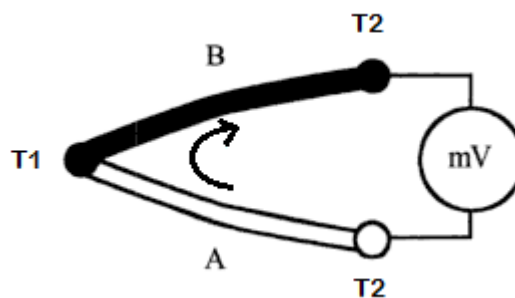


Figura 5.2: Efeito Seebeck [11]

Esta função, aproximadamente linear, é conhecida e catalogada para todos os termopares definidos por norma, relacionando a tensão gerada com a temperatura verificada na junta de medição, considerando a junta fria a 0°C . Em aplicações práticas nem sempre é possível submeter a extremidade de referência a esta temperatura, de forma que equipamentos adequados para a medição utilizam eletrônica para compensá-la através de um método conhecido como compensação de junta fria.

Neste projeto, os termopares foram diretamente conectados aos sistemas de aquisição, devido à pequena distância entre eles, pois se esperava uma influência desprezível de ruído eletromagnético. Para a aquisição foram utilizados módulos NI9211, na figura 5.3, da National Instruments, com capacidade de medição de quatro sensores cada e algoritmo de compensação de junta fria integrado.

5.1.1: Motor A

Visando abranger tanto quanto possível do comportamento térmico do motor A, optou-se por posicionar sensores em cada um dos enrolamentos de fase e também no ferro, situado no mesmo dente que a fase medida. Adicionalmente, para avaliar



Figura 5.3: Módulo de aquisição NI9211 [12]

o gradiente vertical de temperatura, já que o eixo de rotação do motor é ortogonal à base da máquina, os enrolamentos foram instrumentados em suas superfícies inferiores e superiores. Outros sensores foram posicionados próximos ao rotor, mas não em contato direto, com o objetivo de avaliar a temperatura ambiente e utilizá-la como referência. O posicionamento dos termopares de fase pode ser visualizado na figura 5.4 e um exemplo da fixação de termopar no ferro, na figura 5.5.

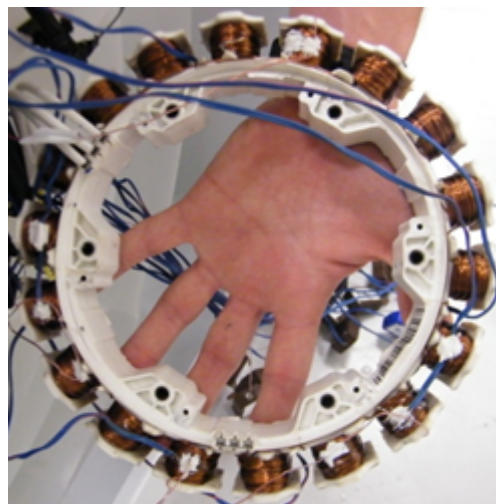


Figura 5.4: Instrumentação dos enrolamentos do motor A

5.1.2: Motor B

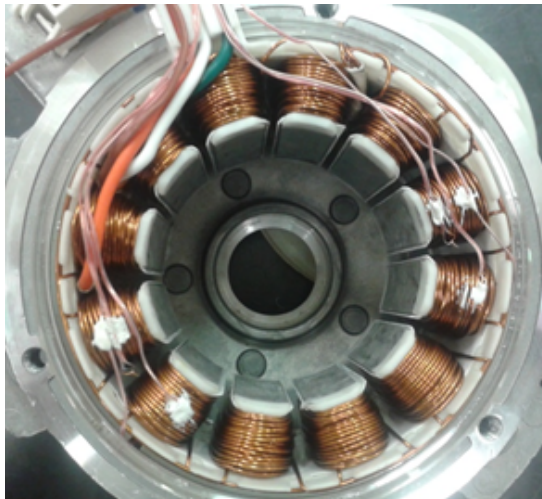
O motor B apresenta dimensões reduzidas em comparação com o motor A e seu rotor é externo ao estator, de forma que o posicionamento de sensores é limitado por suas dimensões físicas. Partindo do pressuposto que as fases do motor são



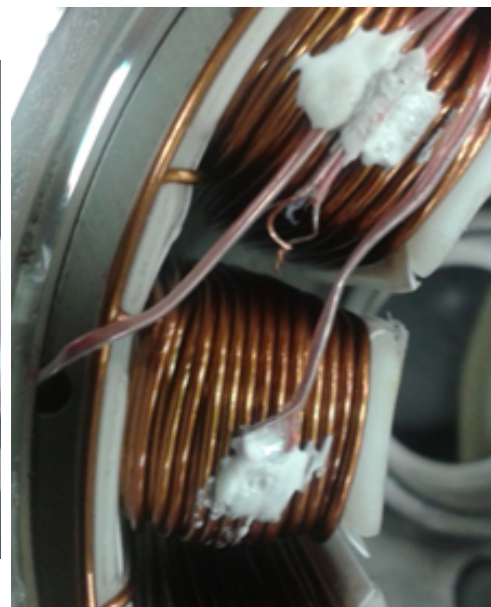
Figura 5.5: Instrumentação do ferro do motor A

balanceadas, de forma que suas respectivas correntes são iguais, assim como seus padrões de aquecimento, foram instalados sensores de temperatura nas bobinas do motor apenas na parte inferior e superior do mesmo. A parte superior foi definida como, após a montagem do motor na máquina de lavar, a parte mais distante do chão.

Há também sensores no ferro, inseridos em cavidades na parte interna da carcaça do motor; termopares na carcaça externa e termopares relativos à temperatura ambiente, novamente utilizada como referência. A localização dos sensores descritos nessa seção pode ser visualizada nas figura 5.6.



(a) Visão geral da instrumentação



(b) Detalhe dos termopares

Figura 5.6: Instrumentação do motor B

5.2: Sistema de aquisição

O sistema de aquisição desenvolvido neste projeto não deve ser capaz apenas de registrar os valores lidos do sistema de medição. Também é necessário obter informações sobre o motor como a amplitude das correntes de alimentação e sua velocidade de rotação, gerando dados de entrada para o modelo, cuja estimativa será então comparada com a medição dos termopares. Ou seja, cabe ao sistema de aquisição gerar dados adequados para a calibração do modelo.

A primeira etapa consiste em obter as informações adequadas do módulo de controle, entre elas, correntes de fase, velocidade de rotação, resistência medida, transferindo-as da plataforma embarcada para um computador. Esse procedimento é realizado através da configuração, em tempo de compilação, de quais variáveis serão enviadas via cabo USB ao computador, cabendo ao usuário selecionar as informações pertinentes.

Em seguida, utilizando um software desenvolvido por especialistas da empresa, apresentado na figura 5.7, é possível realizar o registro dos dados desejados em períodos de aquisição pré-definidos. O resultado final é um arquivo separado por vírgulas, que servirá de base para o processo de calibração.

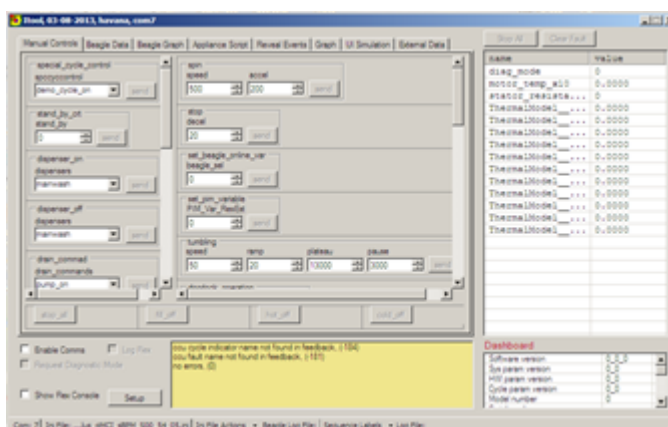


Figura 5.7: Interface visual do software

Os valores fornecidos pelos sensores são adquiridos através de um programa desenvolvido em Labview, apresentado na figura 5.8, se valendo da interface facilitada de comunicação entre essa linguagem e os módulos de aquisição empregados. Em períodos regulares de aquisição, a informação dos módulos é recebida pelo programa e enviada, através de uma interface COM, vastamente utilizada na plataforma Windows para comunicação entre processos, para o programa.

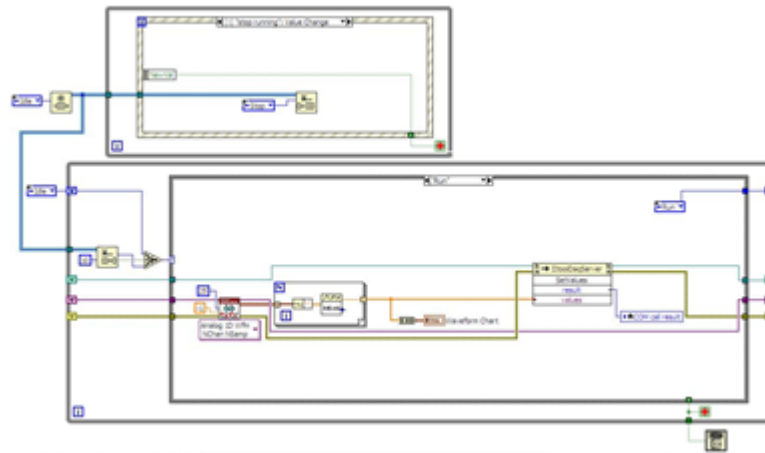


Figura 5.8: Diagrama de blocos em Labview

Vale ressaltar que, durante o período de execução dos ensaios ao longo do projeto, o sistema de aquisição mostrou sofrer certa interferência eletromagnética, especificamente relacionada às correntes de alimentação do motor. A cada período de movimentação do motor, as temperaturas medidas apresentavam uma variação, apresentado na figura 5.9, não coerente com a dinâmica esperada.

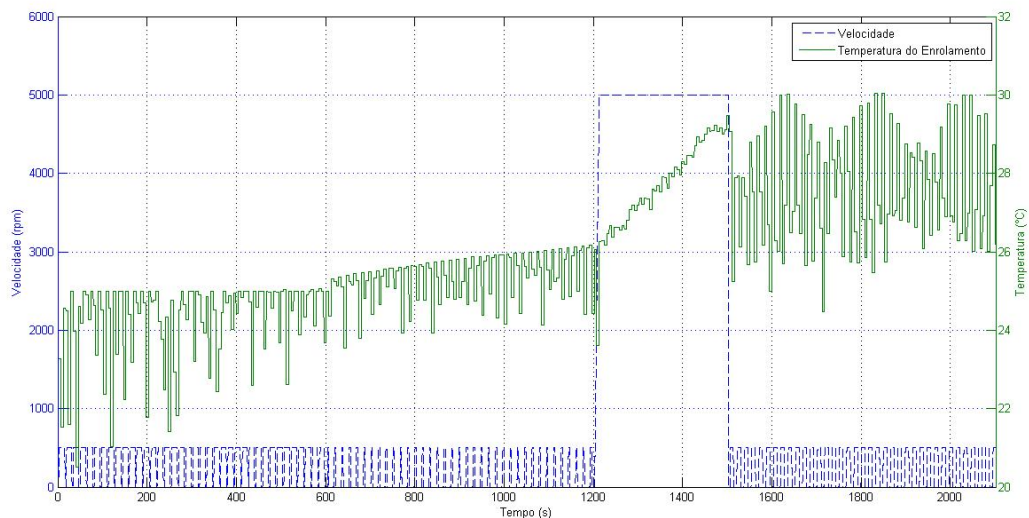


Figura 5.9: Influência da interferência eletromagnética na medição de temperatura

Tal problema só foi resolvido após o isolamento dos termopares com substância não condutora, impedindo que seus componentes entrassem em contato direto com a estrutura metálica do motor. Apesar de essa ação aumentar a inércia térmica do sensor e, portanto, seu tempo de resposta em transitórios de temperatura, é um baixo custo em relação à inserção de erros periodicamente, cujos valores alteram completamente a análise.

Outra opção seria pós-processar os dados, filtrando componentes de mais alta frequência, característica da interferência eletromagnética, deixando apenas as componentes constantes e de mais baixa frequência como resultado. No entanto, essa abordagem também poderia ser responsável por atenuar transitórios legítimos, limitando a visibilidade sobre o processo e, portanto, a calibração do modelo térmico. A adição de um filtro também seria responsável por um atraso na resposta do sistema, alterando a interpretação dos dados.

5.3: Calibração

A etapa de calibração consiste em submeter o motor a diferentes condições de velocidade e carga, partindo em intervalos de frequência variável e com temperaturas iniciais distintas, com o intuito de estabelecer a taxa de aquecimento em função das correntes de excitação do motor e velocidade. Há também avaliação da capacidade de arrefecimento natural, isto é, como ocorre a perda de temperatura do motor quando está desligado ou não acionado.

Serão apresentados, nesta seção, apenas os dados referentes à temperatura de uma das bobinas do motor, obtida através de um termopar, a velocidade rotacional e a corrente RMS de excitação. A primeira pelo papel central desempenhado por esta variável e, como as fases do motor são balanceadas, há aquecimento uniforme em todas as outras sendo redundante apresentar a informação de mais de um enrolamento; as duas últimas para permitir a contextualização entre aquecimento e o ciclo sendo executado. As demais variáveis serão omitidas para manter a clareza na apresentação dos dados.

5.3.1: Motor A

Os testes preliminares de calibração do motor A foram executados utilizando um protótipo da lavadora de eixo vertical, cujo motor apresentava características muito semelhantes à versão final, de forma que os dados obtidos nessa etapa são representativos do seu comportamento térmico e passíveis de servirem como entrada para o software Dymola.

Foram testadas duas condições de carga, a vazio e com carga crítica, isto é, carga capaz de gerar mais torque sobre a unidade acionadora, e alguns perfis de velocidade associados à centrifugação e agitação, com *duty cycle* variável, abrangendo

boa parte da faixa de operação. Parte dos ensaios, cujos resultados são mais expressivos serão apresentados a seguir.

O primeiro ensaio consistiu na avaliação do comportamento do motor sem carga, isto é, rotacionando apenas o agitador, *impeller*, da máquina, durante a etapa de agitação. A velocidade final é constante para todo o ensaio, alterando-se apenas o tempo entre partidas, de forma a tornar as partidas do motor mais ou menos frequentes. Como há maiores níveis de corrente na partida, responsável por vencer o atrito estático inicial e a inércia tanto do cesto quanto do agitador, espera-se comprovar que partidas mais frequentes também significam um maior nível de aquecimento.

Conforme imagem 5.10, podemos verificar que o *duty cycle* 1 é capaz de esquentar o motor, mas a partir do momento em que o tempo de parada entre rotações é reduzido, a derivada da temperatura cresce e o equipamento passa a esquentar de forma mais acelerada. Por outro lado, quando o perfil de velocidade volta a apresentar tempos de parada mais longos, o motor resfria, ou seja, perde calor ao ambiente, pois a energia injetada em seus enrolamentos já não é capaz de superar a capacidade do ambiente em retirá-la. Tal fenômeno ocorre por efeito dos níveis de corrente superiores quando as partidas são mais frequentes.

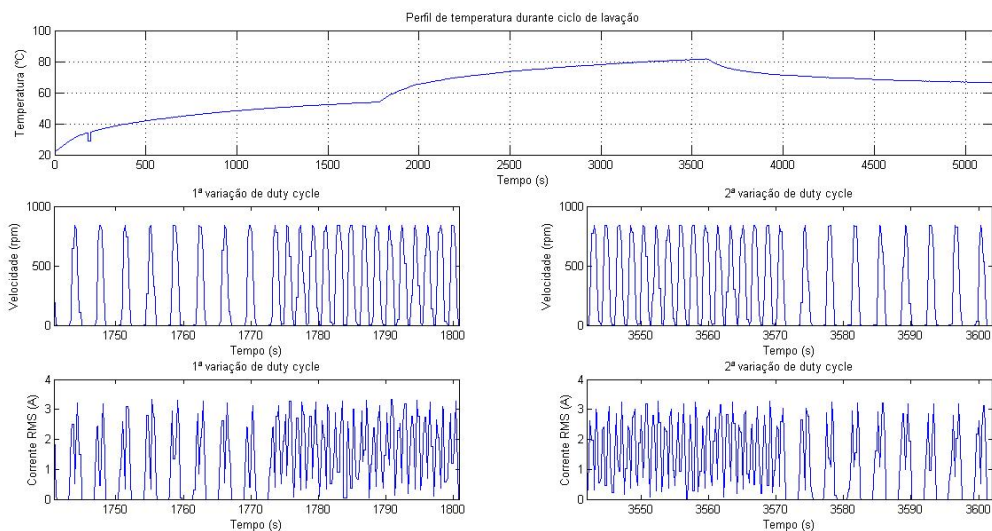


Figura 5.10: Motor A - Perfil de temperatura para ciclo de agitação

O segundo ensaio visava avaliar como variava a temperatura durante o período de centrifugação, caracterizado por velocidade maiores, e com carga crítica. Foi definida uma velocidade de rotação, mantida constante ao longo do experimento, e uma rampa de aceleração, que levasse o motor do estado estático até a velocidade de rotação definida, como vemos na figura 5.11.

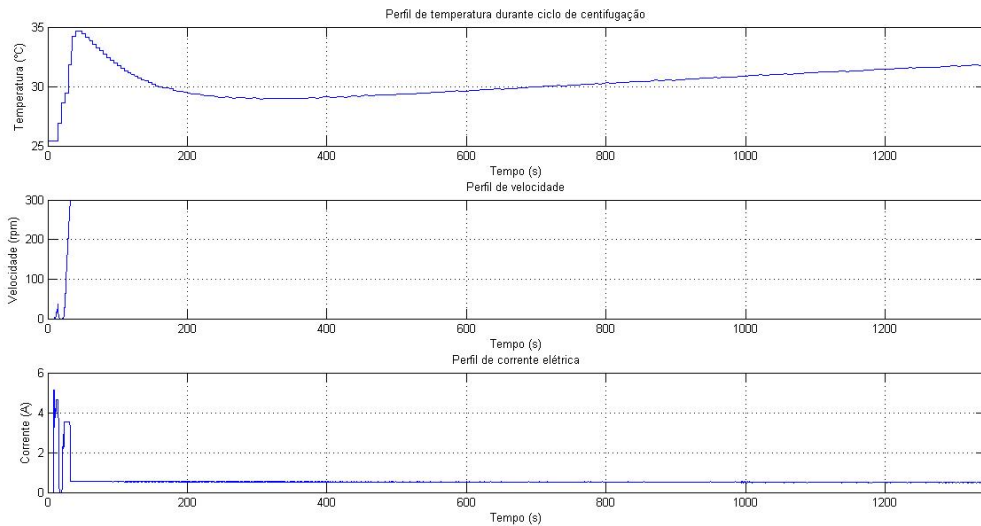


Figura 5.11: Motor A - Perfil de temperatura durante centrifugação

Há, primeiramente, um intenso processo de aquecimento referente ao perfil de corrente necessário para a aceleração da carga crítica. Em seguida, em função da maior velocidade do motor e, por conseguinte, um aumento na capacidade de arrefecimento por convecção, a temperatura do motor atinge um valor máximo e passa a cair. Finalmente, o perfil de temperatura assume o aspecto de rampa, mas com um coeficiente de apenas $11^{\circ}\text{C}/\text{hora}$, muito inferior ao verificado no caso da agitação, em que houve um variação de 30°C em cerca de trinta minutos.

O terceiro ensaio era composto da combinação de todos os elementos analisados anteriormente, permitindo obter uma visão completa. Há dois perfis diferentes de agitação no que se diz respeito ao tempo de parada do motor e um perfil de agitação, em momentos diferentes, como vemos na figura 5.12.

Como visto nas análises acima, o perfil de agitação é responsável pelo aquecimento do equipamento, graças aos níveis mais elevados de corrente, enquanto a fase de centrifugação promove a redução dos níveis de temperatura, favorecida pelo efeito convectivo. Nota-se que a velocidade de centrifugação é inferior a de agitação por limitações físicas do protótipo, mas testes posteriores comprovam esta afirmação mesmo para velocidade de centrifugação superiores.

Há um breve transitório, logo após o início da centrifugação, em que a temperatura sobe, mas como analisado na imagem 5.11, refere-se a um pico de corrente para levar o motor à rotação terminal.

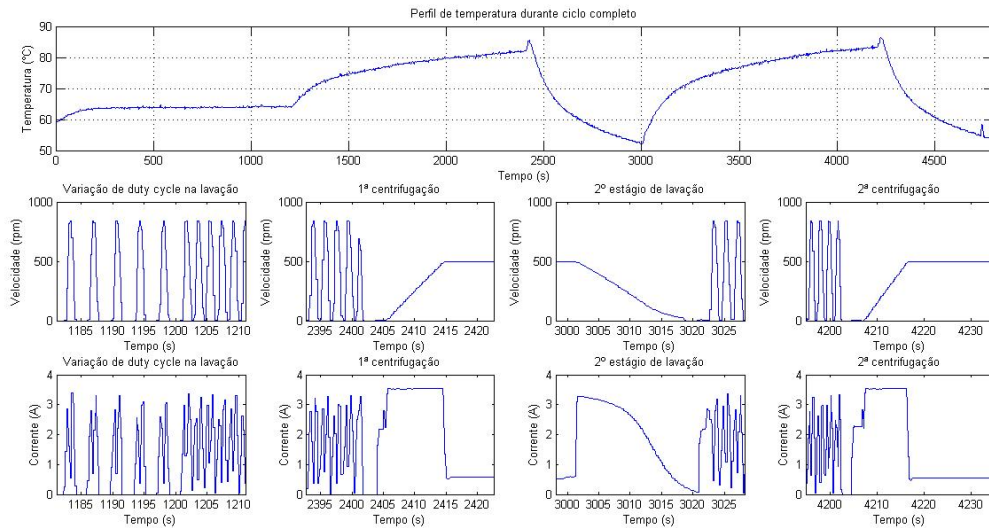


Figura 5.12: Motor A - Perfil de temperatura durante ciclo completo

5.3.2: Motor B

O motor B, utilizado em uma máquina de eixo horizontal, já em uma fase mais avançada dentro do processo de desenvolvimento de produtos da Whirlpool, correspondia à versão definitiva do produto, ao contrário do motor A, ainda definido como protótipo.

Um ponto que merece destaque é o fato de que o ciclo de agitação em máquinas horizontais apresentam partidas menos frequentes do que nos modelos verticais. Isso implica em níveis menores de correntes, já que não há transitórios rápidos e com grande amplitude necessários para vencer a inércia do motor. Também há velocidade muito superiores para a centrifugação.

Diferentemente da plataforma vertical, o primeiro conjunto de testes de calibração foi executado conectando o motor em um dinômetro, visando avaliar seu comportamento térmico em um ambiente controlado, de forma que artificialmente pudessem ser definidos níveis de carga por ação de um freio a ele acoplado e, por conseguinte, a corrente responsável por gerar sua rotação. Esta etapa também foi utilizada para avaliar as perdas do motor, contrapondo a potência fornecida pelo circuito de acionamento e a potência entregue ao eixo.

Nas figuras 5.13 e 5.14 vemos dois dos resultados obtidos. Como esperado, a necessidade de níveis maiores de velocidade é associada com um incremento nos níveis de corrente de excitação, que por sua vez contribuem em grande escala para

o aquecimento do equipamento. No caso 1, reduzindo-se a velocidade rotacional, obtém-se o resfriamento do motor, novamente por redução na magnitude da corrente rms.

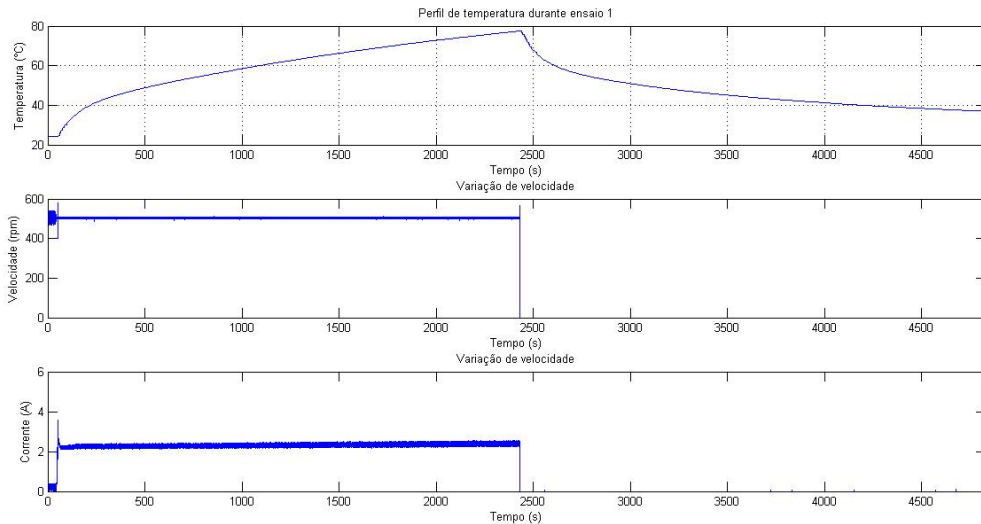


Figura 5.13: Motor B - Perfil de temperatura durante ciclo de agitação e arrefecimento natural

No caso 2, ao contrário do verificado para o motor A, um aumento substancial na velocidade do motor, passando da velocidade típica de agitação para centrifugação, é seguido do aumento da temperatura. Isso ocorre, pois o motor B apresenta uma estrutura muito mais compacta e com pouco espaço para ventilação, de forma que um aumento de sua velocidade não é acompanhado de um aumento na capacidade de arrefecimento por convecção, simplesmente pelo reduzido espaço de circulação de ar através das bobinas do estator.

5.4: Verificação do modelo térmico em tempo de execução

Ao final da etapa de calibração do modelo, como apresentado no capítulo 4, o conjunto de equações que regem a evolução do ponto de vista térmico do motor foi gerado, discretizado e codificado na estrutura microcontrolada, responsável pelo acionamento e condução de um ciclo de lavagem.

Novos experimentos são realizados, executando o modelo de forma paralela à execução do ciclo, contudo sem interferir na sua execução ou gerar valores de resistência para o laço de controle. Os objetivos desses testes são avaliar o desempenho do modelo em diferentes condições de carga, velocidade e temperatura inicial para

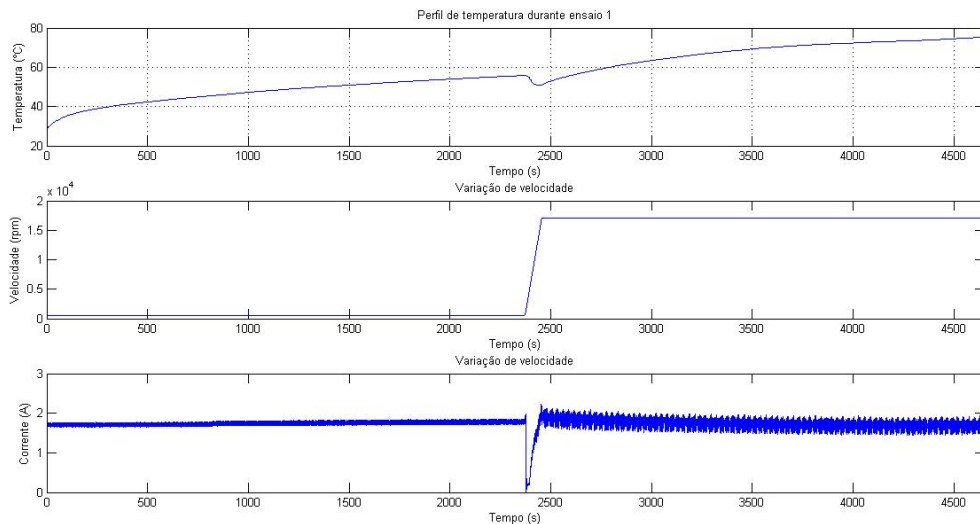


Figura 5.14: Motor B - Perfil de temperatura durante ciclo de agitação e centrifugação

que seja possível estressar o modelo e verificar sua robustez perante situações extremas, garantindo que, caso funcione adequadamente em condições limítrofes, também operará de forma correta em condições domésticas normais.

Adicionalmente, estes testes também contribuem para a verificação do modelo codificado no software embarcado, permitindo avaliar a existência de erros de programação caso os resultados encontrados nessa etapa diverjam daqueles encontrados na etapa de calibração.

Nesta seção serão apresentados os dados relativos à velocidade do motor, para que se possa contextualizar novamente o ciclo com o perfil térmico; a temperatura real, obtida com termopares; a temperatura medida através da resistência e a temperatura estimada pelo modelo, permitindo compará-las e avaliar a precisão do modelo.

5.4.1: Motor A

O motor da plataforma vertical foi submetido, em temperatura ambiente, a um ciclo com perfil de agitação similar ao verificado na etapa anterior, mas em um equipamento com maior capacidade de centrifugação, evidenciada pela velocidade atingida nos momentos finais, como vemos na figura 5.15.

Pode-se notar uma diferença constante entre a temperatura medida através do termopar e as demais, sendo isso um efeito da variação da resistência estática de motor para motor, influenciando os parâmetros da equação 4.3, que converte valo-

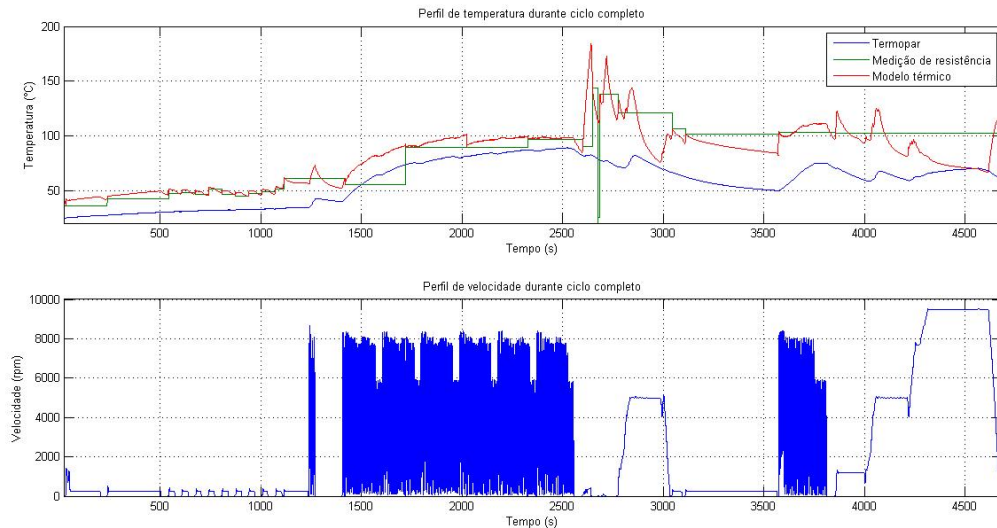


Figura 5.15: Motor A - Comparação entre a temperatura estimada e medida

res de resistência para temperatura. Um pequeno desvio do valor definido como resistência base é suficiente para gerar o erro visualizado no gráfico. No entanto, este erro encontra-se dentro da margem de tolerância e não interfere no desempenho do produto como um todo.

Quanto à comparação entre os valores estimado e medidos de temperatura, pode-se verificar que o modelo é capaz de seguir adequadamente o comportamento da temperatura do motor, apresentando divergências apenas enquanto a medição de resistência não é atualizada. Há ainda espaço para melhorias com a realização de um ajuste fino do modelo.

Observa-se o fato de que, durante a centrifugação, não há atualização do valor de temperatura medido, pois o motor necessitaria ser parado para realizá-la; por outro lado, o modelo térmico continua gerando valores coerentes, permite um controle mais fino do motor e da sua capacidade de gerar torque.

5.4.2: Motor B

O motor da plataforma horizontal passou, até o momento, por um conjunto maior de testes, devido ao estágio avançado em que o produto se encontra. Dessa forma, o modelo encontra-se mais desenvolvido e apresenta erros consideravelmente pequenos em relação à medição de resistência.

Os experimentos foram realizados, como na etapa de calibração com tempera-

tura iniciais para o motor que variavam entre 4°C a altas temperaturas, superiores a 60°C, passando pela temperatura ambiente. Em alguns casos também foram executados dois ciclos, ao invés de um, para aumentar o tempo de observação do modelo e verificar se não haveria efeitos indesejados da sua longa operação.

Na imagem 5.16, a temperatura inicial do equipamento é aproximadamente 4°C, com carga crítica e são executadas duas rodadas consecutivas do mesmo ciclo de agitação. Como na análise do motor A, há uma diferença constante entre os valores medidos por termopar e por resistência dos enrolamentos, novamente atribuído a diferenças entre o valor real da resistência do motor e valor definido em código.

Importante, porém, é verificar que o modelo térmico acompanha, inclusive durante a centrifugação, adequadamente o perfil de temperatura do motor. Quando comparado à medida por resistência, verifica-se quão próximos ambas as temperaturas se encontram, permitindo gerar um bom nível de confiança em relação ao desempenho do modelo. Adicionalmente, isto é feito sem a atualização periódica do modelo, ou seja, ele está sendo executado sem qualquer referência.

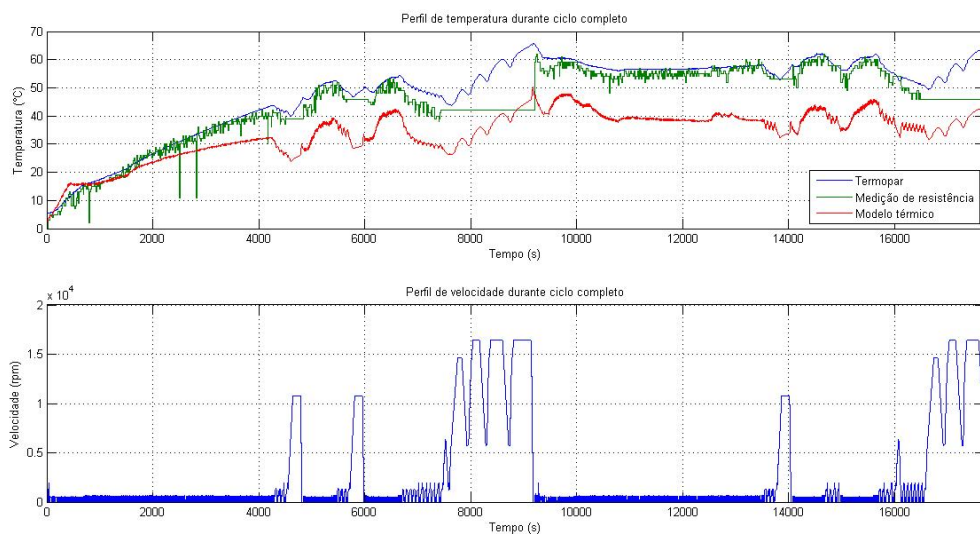


Figura 5.16: Motor B - Comparação entre temperaturas medida e estimada - Temperatura do motor 4°C

A seguir, o mesmo ciclo foi empregado, mas iniciado quando o motor encontrava-se com elevada temperatura, próxima dos 100°C, como vê-se na figura 5.17. Nota-se que o algoritmo de atualização foi integrado ao código do modelo, impedindo que a divergência entre eles assumia valores inaceitáveis.

O último teste, na figura 5.18, realizado em temperatura ambiente, contribuiu para comprovar a confiança sobre o desempenho do modelo. Novamente se ressalta

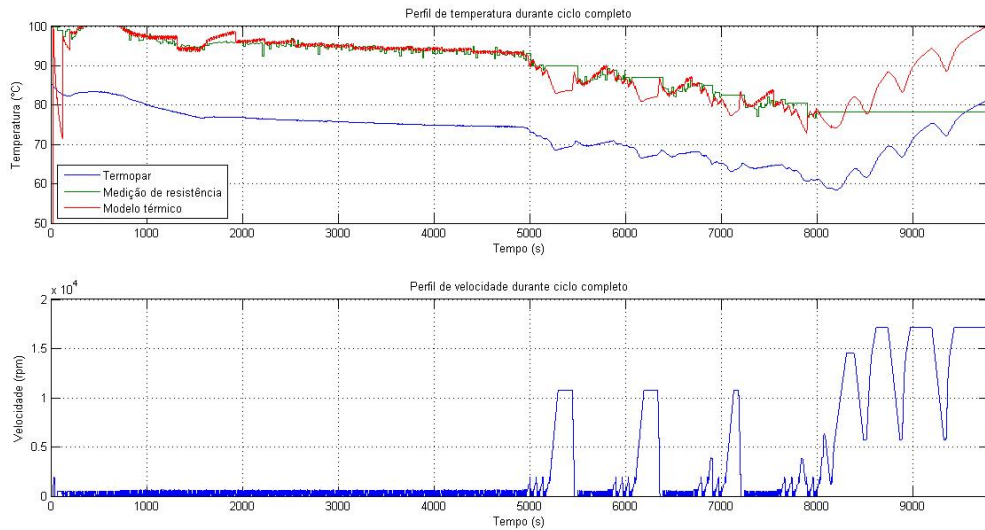


Figura 5.17: Motor B - Comparação entre temperaturas medida e estimada - Temperatura do motor 100°C

o ganho trazido com o modelo ao permitir a estimativa da temperatura, em acordo com a medição direta por sensores, mesmo durante períodos em que o método padrão não é capaz de operar adequadamente.

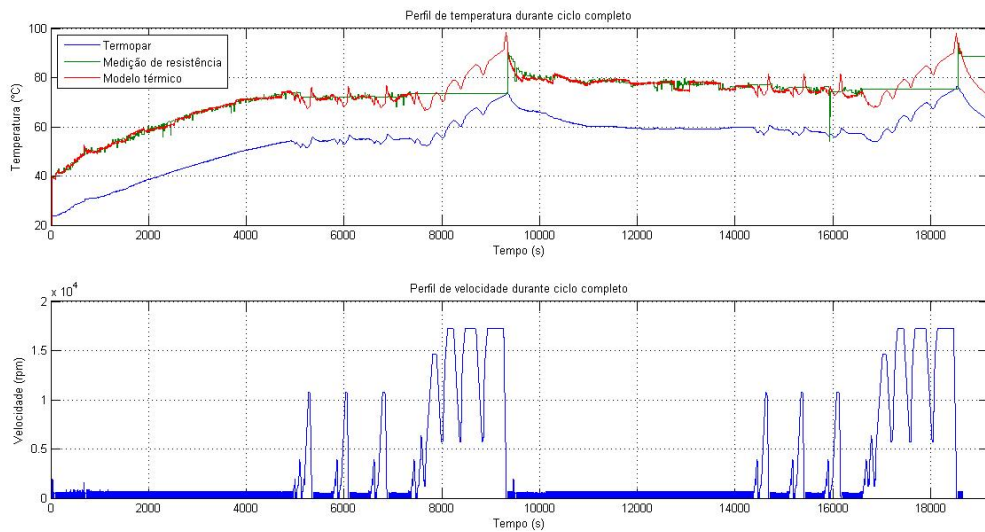


Figura 5.18: Motor B - Comparação entre temperaturas medida e estimada - Temperatura do motor 25°C

5.5: Realimentação com o modelo térmico

A última etapa do desenvolvimento do projeto consiste em realimentar o laço de controle com os valores de resistência calculados a partir da estimativa de temperatura do modelo, através da equação 4.2, e reduzir a frequência da medição de resistência.

Esta etapa foi realizada apenas com o motor B, até o momento, e sua execução constitui-se na alteração do código embarcado para refletir as especificações de periodização de medição de temperatura e estimação. Após a codificação, como podemos ver na figura 5.19, foi realizada uma primeira verificação referente a um ciclo de referência completo em temperatura ambiente.

Como esperado, o comportamento do motor não se alterou durante o experimento por influência da inserção de valores estimados de temperatura, garantindo sua correta operação.

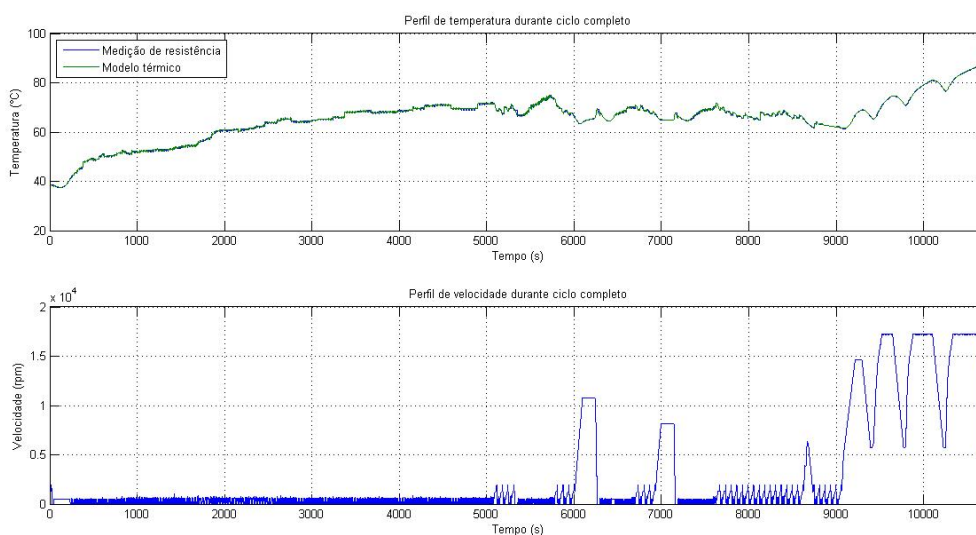


Figura 5.19: Motor B - Perfil de temperatura e comportamento do motor após realimentação

Capítulo 6: Resultados

Neste capítulo, serão apresentados e analisados os resultados tanto da etapa de verificação em tempo de execução do algoritmo, apresentada na capítulo anterior, quanto da realimentação de informações de temperatura provenientes do modelo para o laço de controle. Isto se dará através da análise do erro médio e o desvio padrão entre os valores estimados e medidos, traçando uma comparação entre essas soluções, permitindo traçar a comparação entre ambas as soluções discutidas.

6.1: Verificação do modelo térmico em tempo de execução

O método de análise escolhido será a comparação entre o valor de temperatura através da medição de resistência, utilizado como referência, e a temperatura estimada pelo modelo térmico. Em seguida, a diferença entre esses valores será utilizada como base para avaliar sua influência sobre o comportamento do produto.

Será desconsiderado o erro durante os períodos de centrifugação, pois constituem períodos em que não há atualização nos valores medidos, de forma que a comparação proposta perderia a coerência. Sendo assim, apenas os erros durante a fase de lavagem serão considerados.

6.1.1: Motor A

Como citado anteriormente, o motor A, e o produto que o utiliza, ainda avançarão pelas etapas de desenvolvimento da Whirlpool até atingirem a maturidade necessária para entrarem no mercado. Ainda assim, os resultados verificados na figura 6.1 já são promissores, apresentando uma divergência considerável apenas no período correspondente a 25 minutos de ciclo, quando não há uma medição de resistência e o modelo se afasta do valor padrão.

Contudo, pode-se considerar esse erro, ainda que tenha acontecido durante o período de lavagem, desprezível, pois na atualização seguinte da medição de temperatura, a diferença entre a temperatura estimada e a medida é praticamente nula, indicando que o modelo executou sua função adequadamente.

Ao considerarmos esse evento, o erro médio é de $-2.83^{\circ} C$ e o desvio padrão

de $9.64^{\circ} C$, valores extremamente altos e que poderiam comprometer a operação do sistema. Desconsiderando-o, o erro passa a ser de $-0.7^{\circ} C$, com desvio padrão de $6.69^{\circ} C$, apresentando uma melhora considerável em relação a situação anterior. Naturalmente, ainda há espaço para melhora, especialmente no que diz respeito à precisão da estimação, mas a tendência do resultado indica que o algoritmo não só executou bem sua função, como também indica que a evolução natural do produto durante seu desenvolvimento contribuirão para seu aperfeiçoamento.

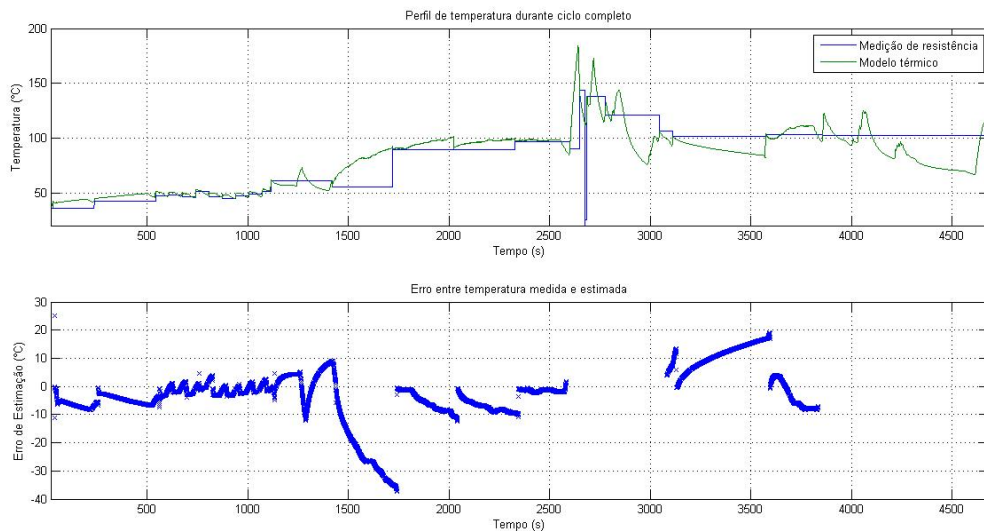


Figura 6.1: Motor A - Erro de estimação para ciclo completo

6.1.2: Motor B

Primeiramente, para o caso em que o algoritmo foi executado sem qualquer método de correção, na figura 6.2, podemos ver que há um erro médio constante entre a referência e o valor estimado. Isso se dá ao fato de que o modelo inicia sua execução com condições iniciais erradas que resultarão em sua divergência do desejado. O erro diverge logo no início até atingir o valor final de $20^{\circ} C$, de forma que o erro médio é de $10.64^{\circ} C$ e desvio padrão de $6.75^{\circ} C$.

A seguir, ao introduzir no programa o algoritmo de correção, verifica-se que os resultados tornam-se bastante desejáveis, atingiu valores muito próximos dos esperados, como vê-se na figura 6.3. O modelo térmico não só acompanha adequadamente o comportamento da temperatura medida através da resistência, como o erro existente no caso anterior foi atenuado em grande intensidade.

O erro médio foi de $-0.21^{\circ} C$ e o desvio padrão de $1.51^{\circ} C$. Ou seja, 95% das

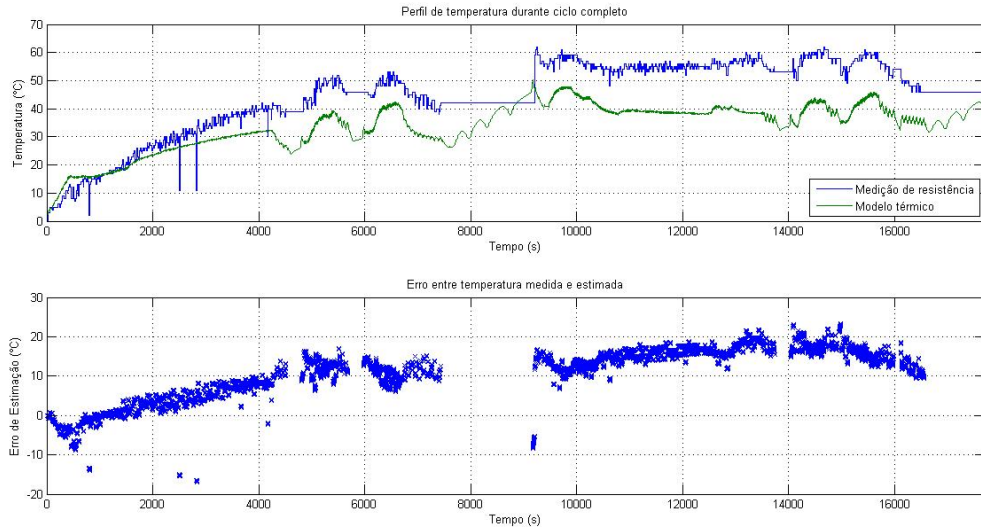


Figura 6.2: Motor B - Erro de estimação sem algoritmo de correção

estimações, dois desvios padrões, situar-se-ão dentro de uma faixa de $\pm 3^\circ C$, mostrando a maturidade e a capacidade do modelo térmico em gerar resultados de alta confiabilidade.

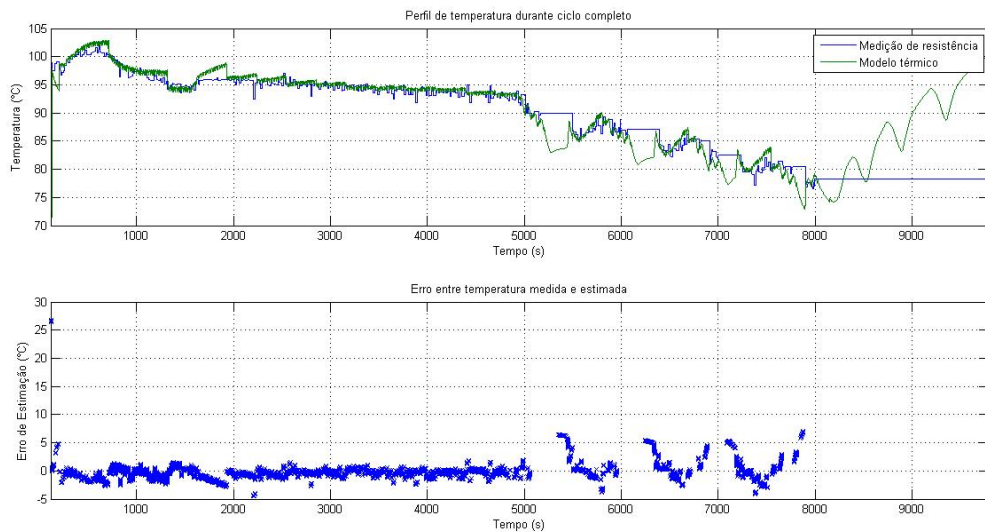


Figura 6.3: Motor B - Erro de estimação após utilização do método de correção - Temperatura do motor $100^\circ C$

O último experimento apresentado segue esse padrão, confirmando os bons resultados atingidos pela aplicação do modelo térmico no motor B, como vemos na figura 6.4. Os pontos principais de divergência entre modelo e medição ficam próximos do final de etapas de centrifugação, pois não há atualização no valor de resistência, permitindo ao modelo ser executado sem referência e, em alguns casos, divergir. Con-

tudo, assim que a resistência é atualizada, o modelo retoma o comportamento desejado e mantém o padrão de alta precisão e exatidão. Os resultados obtidos foram erro médio de $0.09^{\circ}C$ e desvio padrão de $2.22^{\circ}C$, ou seja, 95% das amostras se encontram dentro da faixa de $\pm 4.44^{\circ}C$.

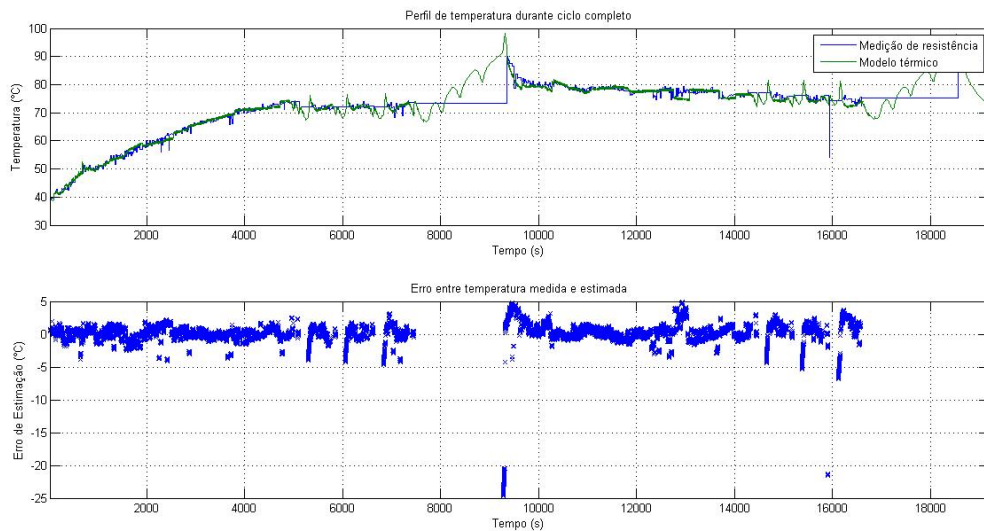


Figura 6.4: Motor B - Erro de estimação após utilização do algoritmo de correção - Temperatura do motor $25^{\circ}C$

6.2: Realimentação do modelo térmico

Para verificarmos o desempenho do modelo térmico quando gera valores de temperatura para o laço de controle, não podemos nos valer da verificação dos níveis de erro obtidos, pois o microcontrolador define como o valor real a estimação produzida pelo algoritmo, de forma que o erro é realmente zero ao longo de sua execução. Adicionalmente, na etapa anterior já foi obtida comprovação da exatidão e precisão do modelo.

Nesta etapa, portanto, avaliar-se-á a influência da aplicação do modelo, isto é, com a redução da quantidade de medições de resistência realizadas, quais os efeitos observados no comportamento do produto, seja na temperatura final alcançada pelo motor, seja nos níveis de corrente. Será utilizada como base de comparação a temperatura utilizada no laço de controle para que seja observado o comportamento físico do motor diretamente.

Como vê-se na figura 6.5, para uma mesma temperatura ambiente e condição de carga, vazia, após a introdução do algoritmo de estimação de temperatura, e con-

sequente redução no número de medições de resistência através da injeção de corrente elétrica, o produto apresenta uma variação de temperatura consideravelmente menor no início do ciclo, período caracterizado pela fase de lavagem.

Ao final, durante a centrifugação, a temperatura final é similar para os dois casos, pois não depende da injeção de corrente e sim da capacidade de arrefecimento do motor, que não muda de um teste para outro. A redução no nível médio de corrente é de aproximadamente 7% após a utilização do algoritmo proposto, valor suficiente para gerar uma diferença de até $26^{\circ}C$ em alguns momentos do ciclo.

Tais resultados corroboram as afirmações apresentadas no começo desse relatório de que a aplicação de um modelo térmico para estimação de variáveis de um motor contribuíam para a redução da temperatura, maior eficiência energética por redução do consumo de corrente, gerando valores confiáveis de temperatura através da utilização de variáveis já disponíveis na estrutura de controle utilizada atualmente.

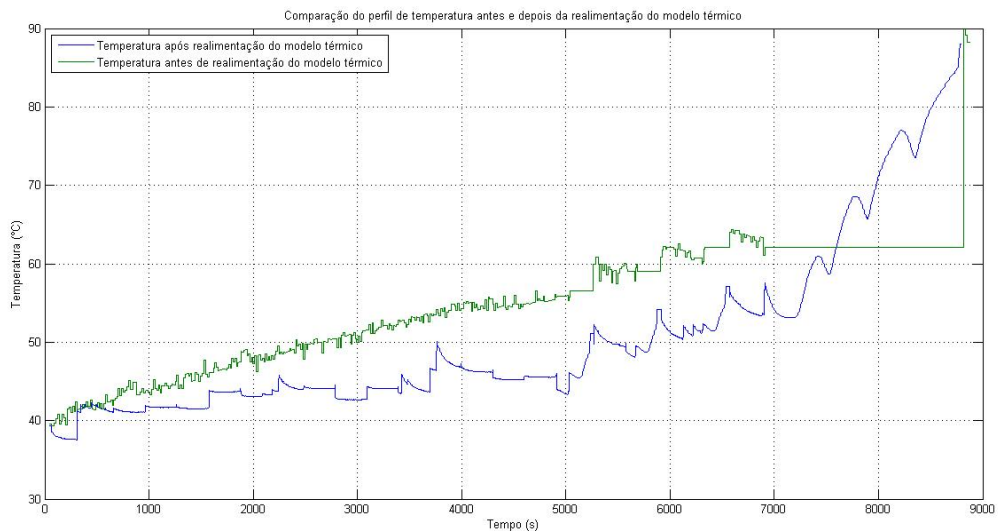


Figura 6.5: Motor B - Comparação entre ciclos utilizando ou não a realimentação do modelo térmico

Capítulo 7: Conclusões e Perspectivas

Como apresentado no começo deste relatório, o mercado de eletrodomésticos é extremamente competitivo, ao ponto que até os pequenos diferenciais de eficiência, flexibilidade e usabilidade são capazes de alterar o panorama do mercado, gerando ou retirando participação de mercado das companhias que lançaram os produtos.

O algoritmo de estimação de temperatura para motores de ímã permanente apresentado nesse relatório não é visível ao usuário diretamente, por tratar-se de uma rotina executada no microcontrolador de uma máquina de lavar, mas seus benefícios são sensíveis, no diz respeito a eficiência energética, vida útil do motor e capacidade de flexibilização de ciclo.

Os resultados apresentados comprovam a eficiência do método proposto para ambos os motores, ainda que haja espaço para melhoria e etapas de desenvolvimento a serem cumpridas, e dão segurança para afirmar que esta é uma tecnologia realmente inovadora e com potencial de tornar as máquinas de lavar melhores.

Ao final deste projeto, já havia o plano para estender a utilização da técnica para alguns outros modelos de motores, mostrando a confiança depositada na solução. Espera-se, entretanto, que esta mudança atinja todos os motores utilizados, realizando novamente as etapas de desenvolvimento apresentadas nesse relatório até que estes também sejam capazes de gerar estimativas adequadas.

Do ponto de vista pessoal, o trabalho executado contribui em larga escala para o enriquecimento pessoal, ao permitir aplicar conhecimentos adquiridos no curso de Engenharia de Controle e Automação, como instrumentação e programação para microcontroladores, e adquirir conhecimento sobre áreas mais específicas, como as ciências térmicas e a aspectos construtivos de motores elétricos. Dessa forma, ao aliar áreas do conhecimento tão distintas, foi possível atingir as metas propostas no início deste projeto.

Referências

- 1 CATÁLOGO Selo Procel 2011. 2011. Disponível em: <http://www.eletronbras.com/elb/procel/main.asp?TeamID=2DEB4057-D085-49A8-A66E-5D946249DC56>.
- 2 OUR History. Disponível em: <http://www.whirlpoolcorp.com>. Acesso em: dezembro de 2013.
- 3 WASHING Machine Troubleshooting & Repairs. Disponível em: <http://www.hometips.com/repair-fix/washing-machine-troubleshooting-problems.html>. Acesso em: fevereiro de 2014.
- 4 HOW Direct Drive Will Revolutionize The Washing Machine Market. Disponível em: <http://www.twice.com/appliances/appliances/how-direct-drive-will-revolutionize-washing-machine-market/19097>. Acesso em: fevereiro de 2014.
- 5 VIEIRA, L. Motores Elétricos - Princípios e fundamentos. Disponível em: <http://www.ebah.com.br/content/ABAAAwep0AI/mototes-eletricos>.
- 6 LESSONS In Electric Circuits - Volume II - AC Motors. Disponível em: http://www.ibiblio.org/kuphaldt/electricCircuits/AC/AC_13.html. Acesso em: dezembro de 2013.
- 7 ROTATING 3 phase magnetic field. Disponível em: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rotating-3-phase-magnetic-field.svg>. Acesso em: janeiro de 2014.
- 8 BOJOI, R. et al. Sensorless direct flux and torque control for direct drive washing machine applications. 2011.
- 9 WHIRLPOOL Corp. internal documents.
- 10 BAPTISTA, B. et al. Temperature distribution inside a three-phase induction motor running with eccentric airgap. 2012.
- 11 MICHALSKI, L. e. a. Temperature Measurement. [S.l.]: Wiley Editorial, 2001.
- 12 NI 9211. Disponível em: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/pt/nid/208787>. Acesso em: janeiro de 2014.
- 13 WHIRLPOOL Annual Report 2012. 2012. Disponível em: http://www.whirlpoolcorp.com/2012Annual/WHR_2012AR.pdf.
- 14 FORTUNE 500. Disponível em: <http://www.uspages.com/fortune500.htm>. Acesso em: dezembro de 2013.
- 15 SOBRE a Whirlpool. Disponível em: <http://www.whirlpool.com.br/SobreaWhirlpool>. Acesso em: dezembro de 2013.
- 16 HUD RELEASES 2009 AMERICAN HOUSING SURVEY. 2009. Disponível em: http://portal.hud.gov/hudportal/HUD?src=/press/press_releases_media_advisories/2010/HUDNo.10-138. Acesso em: dezembro de 2013.

- 17 THE Expected Lifespans of Washing Machines. Disponível em: <http://homeguides.sfgate.com/expected-lifespans-washing-machines-67293.html>. Acesso em: janeiro de 2014.
- 18 WHAT users can save with energy and water efficient washing machines. 2013. Disponível em: http://www.bigee.net/media/filer_public/2013/09/30/bigee_domestic_washing_machines_user_savings_20130328.pdf.
- 19 WASHING machine buying guide. Disponível em: <http://www.consumerreports.org/cro/washing-machines/buying-guide.htm>. Acesso em: dezembro de 2013.
- 20 J. C. Worst. Belt Drive Mechanism for Automatic Clothes Washing Machine. 1976. Disponível em: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US3978693.pdf>.
- 21 LACALLE, N. L.; LAMIKIZ, A. Machine Tools for High Performance Machining. [S.l.]: Springer, 2009. 78-80 p.
- 22 BEATY, H. W.; KIRTLEY, J. L. Electric Motor Handbook. [S.l.]: McGraw-Hill Handbooks, 2004.
- 23 GIERAS, J. F.; WING, M. Permanent Magnet Motor Techonolgy. [S.l.]: Marcel Dekker, Inc., 2002.
- 24 BELD, K. Mathematical modelling and predictive control of permanent magnet synchronous motor drives. Transactions on Electrical Engineering, v. 2, 2013.
- 25 HAQUE, M. E.; RAHMAN, M. F. Influence of stator resistance variation on direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive performance and its compensation. 2001.
- 26 GAO, Z. Sensorless Stator Winding Temperature Estimation for Induction Machines. Tese (Doutorado) — Georgia Institute of Technology, 2006.
- 27 G. B. Kliman e J. H. Dymond. Sensorless Estimation of Rotor Temperature in Induction Motors. 2000. Disponível em: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US6042265.pdf>.
- 28 S. Lee. Method for Estimating Resistance Values of Stator and Rotor of Induction Motor. 1999. Disponível em: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US5998958.pdf>.
- 29 R. J. Kerkman, B. J. Seibel e D. Busse. Stator Resistance Detector for Use in Electric Motor Controllers. 1996. Disponível em: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US5502360.pdf>.
- 30 L. Chalupa e R. Visinka. Apparatus and Method for Estimating the Coil Resistance in an Electric Motor. 20002. Disponível em: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US6366865.pdf>.
- 31 B. J. Arnet. Indirect Rotor Resistance Estimation System and Method. 2009. Disponível em: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US7560895.pdf>.

- 32 Berry et al. Motor Temperature Estimation Based on Thermal Model. 2012. Disponível em: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US8482237.pdf>.
- 33 S. Fujita e A. Sakai. Motor Temperature Estimator and Motor Controller. 2003. Disponível em: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US7129660.pdf>.
- 34 G. Giuseppe. Induction Motor Drive and a Parameter Method Thereof. 2001. Disponível em: <https://docs.google.com/viewer?url=patentimages.storage.googleapis.com/pdfs/US6281659.pdf>.
- 35 RESISTANCE: Temperature Coefficient. Disponível em: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/restmp.html>. Acesso em: dezembro de 2013.
- 36 YANG, B. Development of Thermal Models for Permanent-Magnet Traction Motors. Dissertação (Mestrado) — School of Electrical Engineering, Royal Institute of Technology, 2009.
- 37 GROBLER, A. J. Thermal modelling of a high speed permanent magnet synchronous machine. Tese (Doutorado) — Potchefstroom campus, North-West University, 2011.